



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

복사 난방 패널의 건물 외주부 적용을 위한
열쾌적성 평가 및 방열 조건 설정

Evaluating Thermal Comfort and Establishing Thermal Output
Condition of Radiant Heating Panel
for Application of Perimeter Zone in Buildings

2018년 2 월

서울대학교 대학원

건축학과

조 구 상

국 문 초 록

복사 난방 패널은 자연 대류의 원리에 의한 방열로 차가운 기류와 열교환을 하기 때문에 부하 변동에 대한 빠른 대응과 외주부에서 담당해야 하는 난방 부하를 처리하기에 충분한 열량을 공급하지 못할 수도 있으므로 이로 인해 외주부에서 발생할 수 있는 downdraft와 같은 불쾌적 문제를 유발하지 않는지 선행적으로 검토가 필요하다. 또한 복사 난방 패널의 방열은 실내 기류의 흐름에 민감하게 반응할 수 있으므로 침기나 내부방열과 같은 건물 실내외 환경의 영향을 고려해야 하며, 복사 난방 패널의 방열로 인한 복사불쾌적의 문제가 발생하지 않아야 한다.

이에 본 연구에서는 열쾌적성 측면에서 복사 난방 패널이 외주부에 적용 가능한지 평가하였다. 이를 위해 건물 외주부에서의 열쾌적성 및 복사 난방 패널의 방열 특성에 대해 고찰하고 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가할 수 있는 모델을 구축하여 CFD 시뮬레이션을 통하여 열쾌적성을 평가하였다, 그리고 열쾌적성 평가 결과를 바탕으로 복사 난방 패널을 건물 외주부에 적용할 수 있는 방열 조건을 제시하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 복사 난방 패널의 외주부 적용 시, 외부 환경의 영향이 반영된 창문 내측 표면의 온도와 건물의 실내 환경 요소 그리고 패널의 방열량에 따라 열쾌적성이 달라질 수 있다. 따라서 패널의 복사열로 인한 열공급 및 열손실에 따른 창문의 온도 구배에 대한 해석이 가능하며, 침기나 내부방열과 같은 건물의 실내외 환경 조건이 반영되고 복사 난방 패널의 자연대류를 통한 방열 현상을 모사할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

2) 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가결과, 외부 환경 조건의 기준이 완화될수록 창문의 내표면 온도와 패널의 표면온도와의 차이가 감소하여 단위 면적당 상대적으로 작은 방열량으로 재실영역으로 유입되는 draft rate의 수치가 저감되고 decay ratio가 향상되었다. 이러한 경향은 패널의 방열면적 변화에 따른 열쾌적성 평가 결과에도 유사하게 나타났다. 그리고 복사 난방 패널의 배치 위치에 따른 decay ratio와 radiant temperature asymmetry를 비교해봤을 때, 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 천장에 적용하는 것이 downdraft의 저감 및 복사불쾌적의 방지를 위해 유리하다.

3) 복사 난방 패널의 표면 온도와 창문의 실내 측 표면의 대표 온도간의 차이를 바탕으로 외부 환경 조건의 변화에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 천장 복사 난방과 바닥 복사 난방으로 구분하여 그래프 및 예측식과 보정계수로 제시하였다. 그리고 이를 기본으로 내부 발열의 영향 및 복사 냉방 패널의 적용에 따른 방열 조건 변화를 도출하였다. 또한 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건을 종합적으로 판단할 수 있도록 외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 기본으로 한 복사 난방 패널의 배치 위치별 방열 조건 차트를 제시하였다. 제시된 차트를 통해 열쾌적성 측면에서 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성을 평가할 수 있다.

□ 주요어 : 복사난방패널, 건물외주부, 열쾌적, 방열조건, 표면온도, CFD
시뮬레이션

□ 학 번 : 2010-30173

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	6
제 2 장 복사 난방 패널의 건물 외주부 적용에 관한 예비적 고찰	11
2.1 건물 외주부에서의 열쾌적성	12
2.1.1 건물 외주부의 열적 특성	12
2.1.2 외주부에서의 열쾌적성 평가 방법	20
2.1.3 열쾌적성에 영향을 주는 건물의 실내외 환경 요소	42
2.2 열쾌적성 측면에서의 복사 난방 패널 외주부 적용 방법	45
2.2.1 복사 난방 패널의 방열 특성	45
2.2.2 외주부 적용 시의 방열 특성 변화	48
2.2.3 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 설계 요소	55
2.3 기존 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가	56
2.3.1 실험을 통한 열쾌적성 평가	56
2.3.2 시뮬레이션을 통한 열쾌적성 평가	58
2.3.3 기존 연구의 한계 및 개선 방안	60
2.4 소결	62
제 3 장 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 모델 구축	65
3.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소 모델링	66
3.1.1 시뮬레이션 평가 대상 공간	66
3.1.2 건물의 실내외 환경 요소 모델링 방법	72

3.1.3 복사 난방 패널의 설계 요소 모델링 방법	86
3.2 시뮬레이션 모델 구축	88
3.2.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션	89
3.2.2 시뮬레이션 모델 개발	91
3.2.3 시뮬레이션 모델 검증	105
3.3 소결	112
제 4 장 시뮬레이션을 통한 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가	115
4.1 외부 환경 조건 및 복사 난방 패널의 방열 범위 설정	116
4.1.1 외부 환경 조건의 일반화	116
4.1.2 복사 난방 패널의 방열량	125
4.1.3 적용 가능한 복사 난방 패널의 방열 범위 설정	126
4.2 시뮬레이션 케이스	131
4.2.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소	131
4.2.2 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션 케이스	135
4.3 시뮬레이션 결과	146
4.3.1 건물 외주부에서의 downdraft 평가	150
4.3.2 복사불쾌적 평가	152
4.3.3 복사 난방과 대류 난방의 열쾌적성 비교 평가	154
4.4 소결	165
제 5 장 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건 설정	169
5.1 열쾌적성을 고려한 복사 난방 패널의 외주부 적정 방열 범위	170
5.2 건물의 실내외 환경 요소에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건	175
5.2.1 외부 환경 조건에 따른 패널의 방열 조건 및 예측식	175
5.2.2 내부 발열의 영향에 따른 방열 조건 및 보정 계수	178
5.2.3 복사 난방 패널의 영향에 따른 방열 조건 및 보정 계수	180

5.3 소결	182
제 6 장 방열 조건을 이용한 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법	185
6.1 복사 난방 패널의 방열 조건 설정 방법	186
6.1.1 복사 난방 패널의 기존 설계 프로세스에서의 활용 방법	186
6.1.2 복사 난방 패널의 외주부 적용 시의 방열 조건 설정 방법	188
6.2 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 최적 방열 조건	190
제 7 장 결 론	193

표 목 차

<Table 2.1> Characteristic of perimeter system	16
<Table 2.2> Various definition of downdraft	26
<Table 2.3> Class level for assessment of thermal comfort	27
<Table 2.4> Range for general thermal comfort	29
<Table 2.5> Class level of draft rate	31
<Table 2.6> Example of downdraft occurrence	38
<Table 2.7> Comparative of previous study and this study	61
<Table 3.1> Prototype of simulation space model	68
<Table 3.2> Space range of prototype	71
<Table 3.3> Prototype of simulation space model	71
<Table 3.4> Method of human body (people) modeling	73
<Table 3.5> Method of lighting modeling	74
<Table 3.6> Method of equipment modeling	75
<Table 3.7> Method of integrated modeling	76
<Table 3.8> Characteristics of modeling method	79
<Table 3.9> Input value of simulation model	81
<Table 3.10> Selection of environment parameter model	82
<Table 3.11> Method of infiltration modeling	83
<Table 3.12> Modeling of infiltration in this study	84
<Table 3.13> Modeling of radiant heating panel	87
<Table 3.14> Simulation implementation condition in the Heiselberg's experiment and this study	109
<Table 4.1> Change of inner surface temperature of window	122
<Table 4.2> Inner surface temperature of window by outdoor conditions ...	124

<Table 4.3> Acceptable thermal output conditions	127
<Table 4.4> Radiant temperature asymmetry	128
<Table 4.5> Thermal output conditions and load ratio of Case A	140
<Table 4.6> Thermal output conditions and load ratio of Case B	141
<Table 4.7> Thermal output conditions and load ratio of Case C	142
<Table 4.8> Thermal output conditions and load ratio of Case D	143
<Table 4.9> Thermal output conditions and load ratio of Case E	144
<Table 4.10> Thermal output conditions and load ratio of Case F	145
<Table 4.11> Simulation results	147
<Table 4.12> System assessment conditions	155
<Table 4.13> Temperature distribution	157
<Table 4.14> Velocity profiles	160
<Table 4.15> Draft rate distribution	162
<Table 6.1> Example conditions of target space	190
<Table 6.1> Example results of target space	192

그림 목 차

[Figure 1.1] Flow chart of this study	10
[Figure 2.1] Heat transfer of building envelope (window)	13
[Figure 2.2] Indoor heat transfer on cooling and heating period	14
[Figure 2.3] Thermal characteristics of perimeter system	19
[Figure 2.4] Design criteria for type of building/space	28
[Figure 2.5] PMV-PPD	29
[Figure 2.6] Criteria of effective draft temperature	33
[Figure 2.7] Prediction of draft rate distribution	34
[Figure 2.8] Change of predicted draft rate distribution	35
[Figure 2.9] Limit of floor temperature	40
[Figure 2.10] Limit of radiant temperature asymmetry	40
[Figure 2.11] Calculation method of radiant temperature asymmetry	41
[Figure 2.12] Thermal environment in room	42
[Figure 2.13] Indoor parameters for thermal comfort assessment	44
[Figure 2.14] Descending airflow by cold window	49
[Figure 2.15] Airflow by application of radiant heating panel (narrow area / high surface temperature)	53
[Figure 2.16] Airflow by application of radiant heating panel (wide area / relatively low surface temperature)	54
[Figure 2.17] Parameters of radiant heating panel	55
[Figure 3.1] Modeling method of internal heat gains	77
[Figure 3.2] Parameters for assessment of thermal comfort	90
[Figure 3.3] Schematic description of a room for the simulation	92
[Figure 3.4] Room dimension for simulation	95

[Figure 3.5] Occupied area	95
[Figure 3.6] Description of boundary conditions	96
[Figure 3.7] Modeling method of outdoor environment	98
[Figure 3.8] Selection flow chart of calculation models in STAR-CCM+	100
[Figure 3.9] Generation of mesh model	104
[Figure 3.10] Description of Heiselberg's Experiment	109
[Figure 3.11] Description of this study's simulation	109
[Figure 3.12] Results of maximum airflow velocity comparison	111
[Figure 3.13] Results of draft rate comparison	111
[Figure 4.1] Classification of heating load	119
[Figure 4.2] Thermal resistance of window	120
[Figure 4.3] Inner surface temperature of window by u-value and outdoor temperature	123
[Figure 4.4] Acceptable surface temperature range of radiant heating panel	130
[Figure 4.5] Parameters for thermal comfort assessment of RHP	132
[Figure 4.6] Process of thermal output set-up	134
[Figure 4.7] Number of cases for thermal comfort assessment	138
[Figure 5.1] The relationship between ceiling panel and outdoor conditions (the point when the draft rate falls below class A)	171
[Figure 5.2] The relationship between ceiling panel and outdoor conditions (the point when the occupation area is starting)	171
[Figure 5.3] The relationship between floor panel and outdoor conditions (the point when the draft rate falls below class A)	173
[Figure 5.4] The relationship between floor panel and outdoor conditions (the point when the occupation area is starting)	173
[Figure 5.5] Draft rate by thermal output conditions of ceiling panel	176
[Figure 5.6] Draft rate by thermal output conditions of floor panel	177

[Figure 5.7] Draft rate by thermal output conditions of ceiling panel with Internal heat gains	178
[Figure 5.8] Draft rate by thermal output conditions of floor panel with Internal heat gains	179
[Figure 5.9] Draft rate by thermal output conditions of ceiling panel with Internal heat gains and cooling panel	180
[Figure 5.10] Draft rate by thermal output conditions of floor panel with Internal heat gains and cooling panel	181
[Figure 6.1] Step of establishing thermal output condition	189

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.2 연구의 범위 및 방법

1.1 연구의 배경 및 목적

대량소비사회가 주를 이루던 현대사회에 다양한 라이프스타일이 등장함에 따라 사람들의 관심은 양에서 질로 이행한다. 이에 따라 삶의 질에 대한 사람들의 관심으로 건물 실내에서의 열쾌적성에 대해서도 높은 수준을 요구하게 된다. 실내의 쾌적성이 좋을수록 삶의 질이 향상되고 업무의 효율성도 증대된다는 다양한 연구 결과¹⁾²⁾³⁾는 이러한 사실을 뒷받침하고 있다. 따라서 현대 사회에서 건물 실내의 열쾌적성에 대한 중요성은 점점 높아지고 있으며, 실내 공간의 효율적 사용에 대한 요구 또한 증대되고 있다. 이러한 결과, 사람들의 요구에 적합한 시스템으로 복사 난방에 대한 관심이 높아지고 있으며, 실제 적용 사례 또한 많아지고 있다.⁴⁾

-
- 1) Li Lan et al. The effects of air temperature on office workers well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings, Applied Ergonomics 42, 2010, pp29-36.
 - 2) Weilin Cui et al. Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance, Building and Environment 68, 2013, pp114-122.
 - 3) Yousef Al Horr et al. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature, Building and Environment 105, 2016, pp369-389.
 - 4) Rhee, K.N. et al. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. Building and Environment 91, 2015, pp166-190.

복사 난방은 난방 시에 50% 이상의 비율로 복사열을 이용하여 열을 공급하고⁵⁾, 이때 자연 대류의 원리를 통해 열을 공급하므로 실내 온도를 균일하게 형성할 수 있다는 장점이 있다.⁶⁾ 그리고 복사 난방이 적용된 공간에서는 대류 난방이 적용된 공간에 비해 실내 설정온도가 같은 상황에서 난방 시에는 복사열교환 효과로 인해 높은 작용온도(Operative Temperature, OT)를 얻을 수 있어 대류 난방에 비해 열쾌적성 측면에서 유리하며, 실내 설정온도를 비교적 낮게 유지하더라도 쾌적 범위의 OT를 달성할 수 있으므로 에너지 절감 효과도 크다.⁷⁾ 또한 대류 난방에서 공기를 운송하기 위해 활용되는 fan의 작동동력보다 복사 난방에서 물을 운송하기 위한 pump의 작동동력이 낮아서 운송 에너지를 절감⁸⁾할 수 있으며, 복사 난방에 활용하는 열매체의 온도가 대류 난방에 활용하는 열매체 온도에 비해 열원과의 온도차이가 더 적기 때문에 열원시스템의 COP를 향상시킬 수 있다.⁹⁾ 이러한 열쾌적성 향상 및 에너지 절감 측면 외에도 복사 난방은 바닥이나 천장에 매입되어 복사열을 공급하기 때문에 대류난방 시 발생할 수 있는 불쾌한 토출 기류나 팬에 의해 발생하는 소음 문제 그리고 공간 점유 문제 등을 해결할 수 있으며, 환기를 위한 최소 외기만 공급하면 되므로 급배기 계통의 덕트 사이즈가 작아져서 건물의 층고도 절감할 수 있다.¹⁰⁾¹¹⁾

5) ASHRAE, ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment, 2012

6) Salt, H. Preliminary design considerations for a rockbed/floor space-heating system. Building and Environment 20, 1985, pp221-231.

7) Feustel HE. et al. Hydronic radiant cooling—preliminary assessment, Energy and Buildings 22, 1995, pp193-205.

8) Kwangwoo Kim et al, Radiant Heating and Cooling Systems, ASHRAE Journal 57(2), 2015, pp28-42.

9) Daeuk Shin et al. Energy performance of balanced heat recovery systems with load-balancing, the 6th International Building Physics Conference (IBPC), 2015

10) Per Heiselberg et al. Energy-Efficient Measures to Avoid Downdraft from Large Glazed Facades. ASHRAE Transaction 101, 1995, pp1127-1135.

11) Goosang Joe et al. A Study on the Application of Radiant Floor Heating System to prevent Downdraft in Glass Curtain-wall Buildings, CLIMA 2013

복사 난방은 주로 바닥 복사 난방의 형태로 주거건물에 적용되어 왔으나 요즘에는 열쾌적성 향상 및 에너지 절감 측면의 장점으로 인해 천장 복사 난방 또는 바닥 복사 난방의 형태로 사무소 건물이나 상업 건물에 적용되고 있으며, 건물의 로비와 같이 층고가 높은 대공간에 적용되는 경우도 있다. 그러나 건물에 복사 난방을 적용하는 경우에도 건물 외주부에는 대류 난방 형태의 외주부 시스템을 창문 근처에 설치하여 외주부에서 담당해야 하는 난방 부하를 처리하고 있다.¹²⁾ 그 이유는 일반적으로 복사 난방은 부하 변동에 대한 빠른 대응이 어렵고, 외주부에서 담당해야 하는 난방 부하를 처리하기에 충분한 열량을 공급할 수 없다고 판단하기 때문이다. 그리하여 건물 창 측에서 외피로부터의 열전달에 의해 발생된 차가운 기류를 바로 차단하지 못할 경우, 차가운 창문의 영향을 받아 냉각되면서 하강된 차가운 기류가 거주 영역까지 침입하여 재실자가 국부적인 냉각효과를 받게 되어 국부적 불쾌적을 느끼게 되는 현상인 downdraft¹³⁾를 해결하기 위해 대류 난방 형태의 외주부 시스템을 추가로 설치하고 있다.¹⁴⁾

Downdraft는 겨울철 창문에 근접해 있는 공기가 차가운 창문에 열을 빼앗겨 냉각되고, 냉각된 공기가 하강하여 재실영역으로 유입되면서 나타난다. 따라서 downdraft의 발생을 저감하기 위해서는 차가운 창문과의 열교환으로 냉각된 공기에 열을 공급하여 공기의 온도를 상승시켜주고, 냉각된 공기의 하강 흐름을 방지해주어야 하는데 이를 위해 일반적으로 따뜻한 공기의 공급을 통해 냉각된 공기의 가열 및 하강기류의 상승효과가 높은 대류 난방 형태의 팬코일유닛이나 컨벡터와 같은 외주부 시스템을 사용한다.

12) Lechner Norbert. Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects. John Wiley & sons, 2014

13) ANSI/ASHRAE Standard 55p: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013

14) 조구상 외, 바닥복사난방이 적용된 사무소 건물의 Downdraft 평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 - 계획계 31(4), 2014, pp203-212.

그러나 건물 실내의 열쾌적성에 대한 중요성이 높아지고, 실내 공간의 효율적 사용에 대한 요구가 증대되는 현재 추세에서 고온의 기류를 토출하여 불쾌감을 줄 수 있고, 실내 공간을 점유하는 면적이 큰 팬코일유닛이나 컨벡터와 같은 시스템은 적합하지 않을 수 있다. 현재 추세에서 downdraft의 발생을 저감시키는 이상적인 방법은 적정 수준의 단열성능을 갖춘 창문이 적용되었을 경우에도 실내공간을 점유하지 않고 고온의 기류를 토출하여 불쾌감을 유발하지 않으면서도 냉각된 공기를 가열하여 창문에 근접해 있는 공기의 온도를 상승시키는 것이라 할 수 있는데, 이러한 개념으로 접근을 하면 천장이나 바닥에서 직접 방열을 하여 창에 근접해있는 공기를 따뜻하게 해줄 수 있는 복사 난방의 외주부 적용이 오히려 downdraft의 발생을 저감시키기 위해 적용 가능한 이상적인 외주부 시스템이 될 수 있다.

복사 난방은 건물 구조체의 축열 효과로 일정한 열을 지속적으로 공급하여 냉각된 공기의 온도를 상승시킬 수 있다.¹⁵⁾ 또한 최근 신축되거나 리노베이션 되는 건물들은 U-value 값이 향상된 단열성이 높은 창문을 적용하여¹⁶⁾¹⁷⁾ 외주부에서 담당해야 하는 난방부하가 감소하게 되므로 복사 난방의 외주부 적용 가능성이 더 높다. 그러나 복사 난방은 차가운 공기에 열을 직접적으로 공급하는 것이 아니라, 자연 대류의 원리에 의해 열을 공급하여 차가운 기류와의 열교환 효과로 실내를 난방하기 때문에 외주부에서 담당해야 하는 난방 부하를 처리하기에 충분한 열량을 공급하여 부하 변동에 대응하면서 downdraft를 저감할 수 있는지에 대한 검토가 필요하다.

15) S.H. Park et al. Evaluation of the thermal performance of a Thermally Activated Building System (TABS) according to the thermal load in a residential building. Energy and Building 73, 2014, pp193-205.

16) Sharda, A et al. Comparative study of simulation and experimentation for the U-value of double-glazed windows with inter-pane blinds. Science and Technology for Built Environment 21, 2015, pp179-189.

17) Gao, T. et al. Perspective of aerogel glazings in energy efficient buildings. Building and Environment 95, 2016, pp405-413.

복사 난방은 일반적으로 외주부에 적용 가능한 난방 시스템으로 판단하지 않기 때문에 복사 난방을 외주부 적용하기 위해 요구되는 필요 방열량 및 그에 따른 적정 방열 면적과 표면 온도 등에 대한 기존 데이터가 부재하다. 따라서 복사 난방의 외주부 적용 시, 외주부에서 담당해야 하는 난방 부하를 처리하고 downdraft를 발생시키지 않는 적정 방열량 및 이때의 방열 면적과 표면온도와 같은 방열 조건이 제시되어야 한다. 또한 복사 난방은 자연 대류의 원리로 열을 공급하므로 작은 기류의 흐름에도 복사 난방의 방열 조건이 민감하게 반응할 수 있으므로 이에 영향을 줄 수 있는 침기나 내부발열과 같은 건물의 다양한 실내외 환경 조건에 따라 복사 난방의 방열 조건을 설정해야 한다. 그리고 외주부에서 담당해야 할 난방 부하를 처리하고 downdraft를 발생시키지 않기에 적합한 방열 조건이 제시되었다 할지라도 이때의 방열 조건이 복사불쾌적과 같은 복사 난방의 적용으로 인해 발생할 수 있는 다른 불쾌적 문제는 없는지도 검토해야 한다. 즉, 복사 난방의 외주부 적용을 위해서는 복사 난방의 방열 조건에 따라 난방 부하를 처리하면서도 동시에 열쾌적성을 확보할 수 있는지 그리고 복사 난방의 적용으로 인해 나타날 수 있는 복사불쾌적 문제는 없는지 검토해야 한다.

만일 자연대류의 원리로 열을 공급하는 복사 난방이 외부주에서의 난방 부하를 처리하고 downdraft와 같이 건물 외주부에서 발생할 수 있는 문제를 해결하여 기존의 대류 난방을 대체할 수 있다면, 복사 난방이 기존에 제공하던 이점에 더하여 보다 높은 수준의 쾌적성을 기대할 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 복사 난방이 외주부에서 담당해야 하는 난방 부하를 처리하면서 동시에 쾌적성을 확보할 수 있는지에 대해 건물의 다양한 실내외 환경 조건에 따라 복사 난방의 열쾌적성을 평가하여 열쾌적성 측면에서 외부주에 적용 가능한 복사 난방의 방열 조건을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 외주부에 적용되어온 기존의 대류 난방을 열쾌적성 측면에서 복사 난방이 대체할 수 있는지 평가하기 위해 외주부에서의 난방 부하를 처리하고 열쾌적성을 확보하기 위해 요구되는 복사 난방의 방열 조건에 대해 평가하고자 한다. 복사 난방은 복사열 효과와 자연대류의 원리로 열을 공급하는데, 현재까지 외주부에 적용되는 난방 시스템은 강제대류의 원리를 활용하는 대류 난방 시스템이다. 따라서 복사 난방으로 외주부에서 담당해야 할 부하를 처리하고 동시에 열쾌적성을 확보하기 위해서는 건물 외주부에서 난방 부하를 처리하기 위해 요구되는 열량 및 downdraft나 복사불쾌적 등을 발생시키지 않고 열쾌적성을 만족시키는 복사 난방의 적정 방열 조건이 제시되어야 한다. 이와 같은 복사 난방 패널의 건물 외부주 적용을 위한 열쾌적성 평가 및 방열 조건 설정을 위해 본 연구에서는 다음과 같은 범위 및 방법에 따라 연구를 수행하였다.

(1) 복사 난방 패널의 외주부 적용에 관한 예비적 고찰

열쾌적성 측면에서 복사 난방 패널의 건물 외주부 적용 가능성을 평가하기 위해 외주부에서의 열적 특성 및 열쾌적성 평가 방법을 분석하고 이에 따른 복사 난방 패널의 방열 특성을 도출하고자 하였다.

우선, 건물 외주부에서 발생하는 열전달 현상과 이에 따른 열적 특성을 통해 열쾌적성을 향상시키기 위해 요구되는 물리적인 해결방안을 제시하고 복사 난방 패널의 적용 가능성을 개념적으로 도출하였다. 또한 국외 기준 및 선행 연구를 바탕으로 건물 외주부에서의 열쾌적성 평가 방법을 정립하였으며, 건물 외주부의 열쾌적성에 영향을 주는 실내외 환경 요소를 도출하

여 향후 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가에 활용할 수 있도록 하였다. 그리고 앞서 제시된 외주부에서의 열쾌적성을 위해 요구되는 물리적인 현상을 바탕으로 복사 난방 패널의 방열 특성 및 이에 따른 외주부에서의 방열 특성 변화 양상을 분석하였으며, 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 설계 요소를 도출하였다. 이를 바탕으로 기존 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 연구 사례들을 분석하고 기존 연구의 한계 및 개선 방안을 도출하여 본 연구에서 수행하고자 하는 건물 외주부에 복사 난방 패널의 적용을 위한 열쾌적성 평가 방향을 설정하였다.

(2) 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 모델 구축

복사 난방 패널은 자연대류의 원리로 열을 공급하기 때문에, 건물의 외부 환경과 창문의 침기 그리고 실내의 내부방열에 의해 발생하는 기류 흐름이나 온도 변화 등에 영향을 받게 되며 이는 열쾌적성 측면에서의 복사 난방 패널 방열 조건에 영향을 준다. 따라서 복사 난방 패널을 적용할 경우, 이러한 영향을 반영할 수 있도록 건물의 다양한 실내외 환경 조건을 반영하여 외주부에의 적용 가능성을 분석해야 한다. 이에 본 장에서는 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 모델을 구축하여 CFD 시뮬레이션을 통해 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 수행하고, 외주부 적용을 위한 적정 방열 조건을 설정하고자 하였다. 특정 상황이 아닌 보편적인 상황에서의 적용을 위해서 건물의 평면 유형과 환경 요소를 일반화하였으며, 앞서 도출된 건물의 실내외 환경 요소 및 복사 난방 패널의 설계 요소의 모델링 사례를 분석하여 본 연구에 적합한 모델링 방법을 제시하였다.

그리고 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션 모델은 열쾌적성 평가에 적합한 형상 및 물성치를 입력하고 계산 모델을 선정하였으며,

건물 실내외 환경 요소들의 열쾌적성에 관한 영향도를 반영하여 모델을 구축하였다. 또한 시뮬레이션 모델은 실험을 통해 수행된 유사한 기존 연구 결과와의 비교를 통하여 검증하였다.

(3) 시뮬레이션을 통한 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가

복사 난방 패널의 방열 조건은 외부 환경의 변화에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시되는 결과가 일반적으로 적용 가능한 데이터로서 가치를 지닐 수 있도록 우선, 다양하게 변화하는 외부 환경 조건을 창문의 내측 표면 온도값을 통하여 일반화하였으며, 이에 따라 복사 난방 패널의 방열 범위를 제시하였다. 또한 제시된 범위가 실제 적용 가능한지 판단하기 위하여 복사 난방 패널의 방열과 관련된 국내외 기준 및 연구 사례를 조사하여 적용 가능한 패널의 방열 범위를 설정하였다.

그리고 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위해 고려해야 할 건물의 실내외 환경 요소 및 패널의 설계 요소에 따른 경우의 수를 도출하여 시뮬레이션 케이스를 선정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 건물 외주부에서의 downdraft 및 복사불쾌적의 발생 특성에 대해서 분석하였다. 또한 앞선 예비적 고찰을 통해 복사 난방 패널이 기존의 대류 난방에 비해 개념적으로는 우수한 열쾌적 성능을 나타낼 것으로 판단하였지만, 실제 적용하였을 경우에도 이러한 가정이 맞는지 검토가 필요하므로, 외주부에 적용 가능한 복사 난방 패널의 방열 조건을 선정하여 기존 외주부에 적용되어온 대류 난방과 열쾌적성 측면에서 비교 평가하였다.

(4) 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건 설정

복사 난방 패널은 외주부에서 요구되는 열량과 건물의 실내외 환경 조건

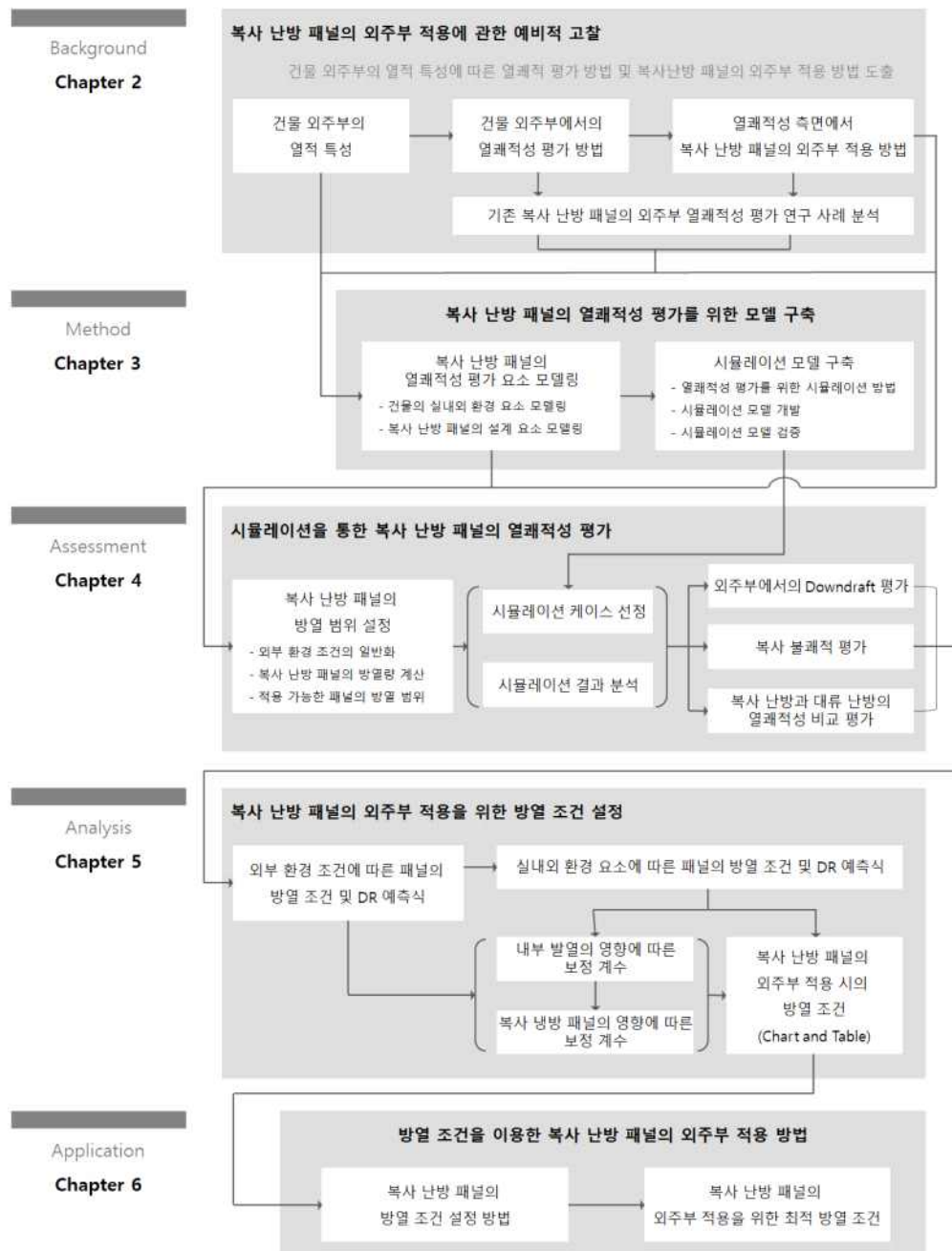
에 따라 난방 또는 냉난방 면적 및 표면 온도와 같은 방열 조건이 결정된다. 따라서 본 장에서는 건물의 실내외 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 열쾌적성 시뮬레이션 평가 결과를 바탕으로 복사 난방 패널의 방열 조건과 외부 환경 조건과의 관계성을 분석하여 복사 난방 패널의 배치별 적정 방열 조건을 도출하고 열쾌적성 확보를 위한 방향성을 제시하였다. 그리고 내부 발열과 같은 실내 환경 조건 및 복사 냉방 패널의 적용에 따른 기류 혼합 양상을 반영하여 복사 난방 패널의 최적 방열 조건을 설정하였다. 이러한 복사 난방 패널의 방열 조건은 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 건물 실내외 환경 요소에 따라 달라지는 열쾌적성을 반영할 수 있도록 예측식 및 보정 계수를 도출하여 설정하였다.

(5) 방열 조건을 이용한 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법

복사 난방 패널의 외주부 적용시 적정 방열 조건을 설정하면 외주부에서의 열쾌적성을 향상시킬 수도 있지만 외부 환경 조건에 따라서는 복사 난방 패널의 방열 조건 범위를 넘어서 외주부 적용이 불가할 수도 있다. 따라서 이러한 다양한 상황을 고려할 수 있도록 본 연구의 결과를 기존 복사 난방 패널의 설계 프로세스상에서 활용할 수 있는 방법과 복사 난방 패널의 외주부 적용 시의 방열 조건을 설정하고 적용하는 방법을 정립하였다. 또한 본 연구에서 제시된 방열 조건을 활용하여 복사 난방 패널을 건물에 적용할 수 있도록 건물에서 실제와 유사한 상황을 가정하였을 때의 사례들에 대한 결과물을 예시로 제시하였다.

이상과 같은 본 연구의 범위 및 방법을 연구 흐름도로 나타내면 [Figure 1.1]과 같다.

복사 난방 패널의 건물 외주부 적용을 위한 열쾌적성 평가 및 방열 조건 설정



[Figure 1.1] Flow chart of this study

제 2 장 복사 난방 패널의 건물 외주부 적용에 관한 예비적 고찰

- 2.1 건물 외주부에서의 열쾌적성
 - 2.2 열쾌적성 측면에서의 복사 난방 패널 외주부 적용 방법
 - 2.3 기존 복사 난방 패널의 열쾌적 평가
 - 2.4 소결
-

건물 외주부 적용을 위한 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하기 위해서는 먼저 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 열쾌적성에 영향을 미치는 물리적인 현상 및 열쾌적성을 평가할 수 있는 방법에 대해 분석하고, 이에 따른 복사 난방 패널의 방열 특성을 고찰할 필요가 있다.

따라서 본 장에서는 건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하기 위한 예비적 단계로써 건물 외주부에서 발생하는 열전달 현상 및 이러한 열적 특성에 따라 적용 가능한 외주부 시스템의 유형을 복사 난방 패널을 포함하여 개념적으로 제시하였다. 또한 건물 외주부에서의 열쾌적성 평가 시에 필요한 열쾌적 요소 및 요소별 평가 기준을 고찰하였으며, 열쾌적성에 영향을 주는 건물의 실내외 환경 요소를 도출하였다. 이를 바탕으로 열쾌적성 측면에서 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법을 분석하기 위해 복사 난방 패널의 기본적인 방열 특성 및 외주부 적용 시 변화하는 방열 특성을 분석하고, 외주부 적용 시 고려해야 하는 설계 요소를 도출하였다. 그리고 국내외 다양한 연구 사례를 조사하여 본 연구에서 주제로 설정한 문제와 이에 대한 기존 연구의 한계 및 해결 방안을 도출하였다.

2.1 건물 외주부에서의 열쾌적성

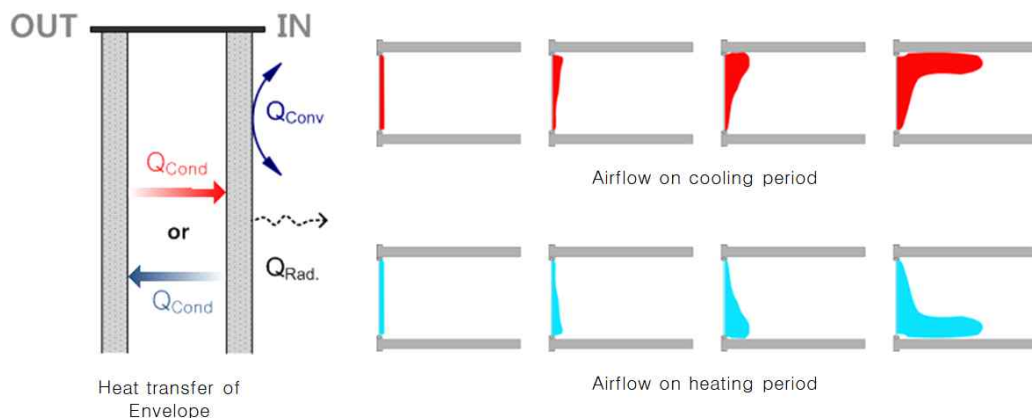
건물 외주부는 실내외의 경계면에 있는 외피(일반적으로 창문)로 인해 일사 및 기후 변화와 같은 외부환경의 영향을 받게 되는 실내 측의 공간으로 건물의 외피에 근접한 공간에 외주부 시스템을 적용하여 외부로부터 전달되어온 열을 신속하게 처리한다. 따라서 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위해서는 외부 환경의 영향을 받은 실내 측 공간에서 재실자의 불쾌감을 유발할 수 있는 원인을 분석하고 이를 해결할 수 있는 물리적인 방법과 이를 위한 복사 난방 패널의 방열 특성을 분석해야 한다. 이를 위해 본 절에서는 먼저 건물 외주부에서의 열전달 현상을 분석하고, 열전달 현상에 따라 건물 외주부에 적용 가능한 외주부 시스템을 선정하였다. 또한 건물에서의 열쾌적 평가 방법에 대해 조사하여 열쾌적 평가에 대한 개념을 정립하였으며, 국외 기준 및 선행 연구를 근거로 외주부에서의 열쾌적성 요소에 대한 정의 및 적용 기준을 조사하고 본 연구에서 적용 가능한 열쾌적 평가 요소 및 이에 대한 기준을 제시하였다. 그리고 복사 난방 패널이 외주부에 적용될 때, 열쾌적성에 영향을 줄 수 있는 건물의 실내외 환경 요소를 도출하여 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 열쾌적성 평가 및 방열 조건 설정에 활용하고자 하였다.

2.1.1 건물 외주부의 열적 특성

건물에서 외기에 면하는 부분으로 실내외의 경계면에 있는 외피와 그 실내 측의 공간은 일사 및 기후 변화와 같은 외부환경의 영향을 받게 되는데, 실내 측의 공간은 실내의 쾌적성을 위하여 외부 환경의 변화에 대응하여 일

정한 환경 조건을 유지한다. 이와 같은 실내외 환경 조건의 차이로 인하여 일사 및 기후에 따라 변화하는 외부 환경과 일정하게 유지되는 실내 측의 공간 사이에서 온도차가 발생하게 되어 외부와 실내와의 열전달 현상이 나타난다.

외부 환경과 실내 측의 온도차로 인해 외주부의 외피(창문)에서 발생하는 열전달 현상에는 전도(Conduction), 복사(Radiation), 대류(Convection) 현상이 있다. [Figure 2.1]와 같이 열전달 현상은 냉방기(여름철)와 난방기(겨울철)에 따라 다르게 나타나는데, 먼저 외부 환경과 외피와의 열전달 현상을 의미하는 외피를 통한 전도(Conduction) 현상이 발생하게 되며 난방기의 경우에는 외부에서 실내 측으로 손실된 열이 복사(Thermal Radiation) 및 대류(Convection) 현상을 통해 실내 측에 영향을 미치게 된다. 즉, 온도가 다른 두 면이 있을 때 온도가 높은 면에서 온도가 낮은 면으로 열이 전달되는 복사의 원리로 외피표면으로부터의 복사열 교환이 이루어져 열이 전달되며, 대류현상의 두 가지 원리인 Diffusive Transport(확산에 의한 열전달)와 Advective Transport(이류에 의한 열전달)에 의해 열이 전달된다.

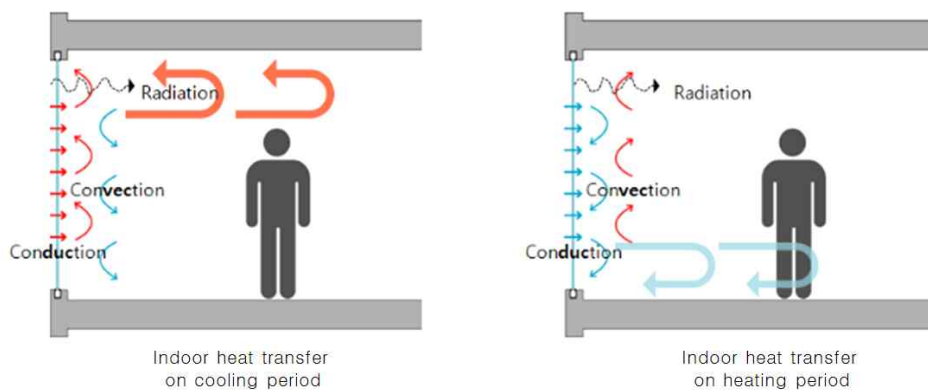


[Figure 2.1] Heat transfer of building envelope (window)

Diffusive Transport는 실내공기와 실내공기가 접한 표면의 온도(여기서는 창문의 온도)가 달라서 생기는 열전달을 의미하며, Advective Transport는 온도가 다른 공기 사이의 직접 이동, 즉 온도가 다른 두 공기가 접해 있을 때 온도에 따른 밀도 차이로 Buoyancy-Driven Flow로 공기가 이동하면서 생기는 열전달 현상이다.

이러한 원리에 의해 [Figure 2.2]와 같이 난방기에는 실내 공기보다 온도가 낮은 외기로 인해 실내에서 외부로의 열손실이 나타나게 되며, 이와 같은 현상이 발생하면 차가운 창문과 재실자 사이의 복사열교환 및 창문에 인접한 부근의 공기 온도가 낮아져서 하강된 기류가 재실자에게 직접 도달하게 되어 도달된 공기와 재실자의 피부 사이의 열교환으로 인해 재실자가 열적 불쾌감을 느낄 수 있는 상태, 즉 실내 쾌적성이 저하될 수 있다.

실내 쾌적성을 향상시킬 수 있는 1차적인 방법으로는 외피의 단열성능을 향상시켜 (즉, 외피의 열전도율을 낮춰서) 외피를 통한 열전달을 저감시키는 방법이 있으며 (외피를 통한 외부와의 전도 차단 및 실내 측에서의 복사 저감), 2차적으로 실내로 전달되어온 열이 재실자에게 도달하기 전에 처리해주는 방법(실내 측으로 전달된 열의 대류)이 있다.



[Figure 2.2] Indoor heat transfer on cooling and heating period

일반적으로 건물의 외피에는 단열성능이 취약한 창문이 차지하는 비율이 높기 때문에¹⁸⁾ 외피의 단열성능이 취약하여 외피를 통한 열전도 현상을 억제하는 것이 쉽지 않다. 창문의 열관류율을 낮춰 차가운 외부에서의 열전달 영향을 감소시킬 수 있도록 유리의 개수를 추가 (삼중창, 사중창, 진공 유리 등)하거나 열관류율의 감소(반사로이유리 등과 같은 고단열 유리의 사용 및 유리의 코팅을 통한 단열성 향상) 및 공기층의 두께를 증대시키는 방법 등을 통하여 열관류율이 낮은 고단열 창문이 다수 개발되어 사용되고 이에 대한 연구도 진행되고 있으나, 고단열 창문의 경우에는 비용이 높기 때문에 건물에 유리의 면적이 늘어나는 추세 속에서 건물 전체에 적용하기에는 비용적인 측면에서 부담이 크게 된다.¹⁹⁾ 따라서 적정 수준(에너지절약계획서 상에서 제시된 창문의 열관류율 기준)의 단열성능을 갖춘 창문이 일반적으로 적용되는 경우가 많다.

그리하여 건물의 설계하는 경우, 창문을 면하고 있는 실내 측 공간의 일부분을 외주부 (Perimeter zone)로 설정하여 외부환경의 변화에 능동적으로 대응할 수 있도록 해야 하므로 2차적인 방법으로 건물의 외피에 근접한 공간에 외주부 시스템(Perimeter system)을 적용하여 외부로부터 전달되어온 열을 신속하게 처리할 수 있도록 한다. 따라서 외주부 시스템을 적용하여 외부로부터 전달되어온 열을 처리하기 위해서는 창문의 온도를 실내 측 공간과 온도와 유사하게 유지하여 외피표면으로부터의 복사열교환 및 확산에 의한 열전달을 억제하거나, 창문에 인접한 부근의 공기온도를 실내 온도가 유사하게 유지할 수 있도록 공기를 공급해주어 이류에 의한 열전달을 억제 해주어야 한다.






18) Ilknur Turkseven Dogrusoy et al. A field study on determination of preferences for windows in office environments, Building and Environment 42, 2007, pp3660-3668.

19) Goosang Joe et al. An Experimental Study on Thermal Performance of Double Skin Facade, 8th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, 2010

외부로부터 전달되어온 열을 처리하는 방법은 외주부 시스템의 특성에 따라 <Table 2.1> 과 같이 달라지는데, 외주부 시스템은 크게 이류에 의한 열 전달을 억제하기 위하여 팬을 이용하여 기류를 형성하여 신속하게 열을 공급하는 방법과 팬 없이 시스템의 표면과 실내 공기의 온도차에 의해 발생하는 부력을 이용하여 열을 공급하는 방법이 있다.

전자의 방법은 강제대류 (Forced convection)식 방법이라 할 수 있으며 기류를 토출하여 외부로부터 전달되어온 열에 시스템에서 나온 열을 혼합하여 실내로 확산시키는 방법과 토출된 기류가 외부로부터 전달되어온 열을 포함하여 실외로 배출시키는 방법이 있다.

<Table 2.1> Characteristic of perimeter system

Classification	Perimeter system				
Heat transfer mechanism	Forced convection			Natural convection, Radiation	
Heat carrier	All air		Air–Water or Water (Steam)		
Fan	O			X	
System type	Perimeter–less	VAV	Fan Coil Unit (FCU)	Convector (Radiators)	Radiant Panel
Application method	Building Integrated: Grille, Register, Diffuser		Units		Ceiling panel Floor panel
	Air barrier system, Airflow window	Supply			
Shape					

후자의 방법은 자연대류 (Natural convection) 형태로 열을 공급하는 방법과 자연대류와 더불어 복사면이 실내에 노출되어 있어 복사열교환을 통하여 열을 공급하는 방법으로 나뉠 수 있다.

강제대류 시스템은 외부로부터 전달되어온 열을 지닌 기류에 신속하게 접근하여 차단할 수 있는 장점이 있어 자연대류 시스템 대비 외피로부터의 열 전달 저감 성능이 우수하고, 재실자의 불쾌감을 저감할 수 있다고 일반적으로 판단하여 사무소 건물에서 주로 적용되고 있으며, Units 형태의 외주부 시스템인 FCU (Fan-coil Units)나 Convectora가 있다. 또한 창문에 일체화되거나 창문 근접한 곳에 설치된 시스템의 Inlet측에서 공급된 기류가 강제대류를 통해 열을 공급하고 천장이나 바닥으로 열을 배기하여 하나의 Barrier를 형성하여 외부와의 열교환을 차단하는 Perimeter-less 시스템인 Air barrier system과 Airflow window system의 적용도 고려되고 있다.

자연대류(Natural convection) 시스템에서는 팬 없이 온도차에 따른 부력을 이용하여 대류 열전달 방식 위주로 열을 공급하는 시스템인 Baseboard heater와 Convectors 등이 있으며, 자연대류 열전달과 더불어 외피와의 복사열교환을 통해 외피의 온도를 상승 또는 하강시켜 외부로부터의 열전달을 저감시킬 수 있는 복사 난방 패널 역시 하나의 대안이 될 수 있다.

이와 같이 외주부 시스템을 적용하는 경우, 외부환경의 영향을 받지 않고 내부발열 등으로 연간 냉방부하가 발생하는 내부주 (Interior Zone)의 경우에는 겨울철에도 냉방이 필요한 경우가 많기 때문에²⁰⁾²¹⁾ 동일한 실에 난방 부하와 냉방부하가 동시에 발생하게 되어 외주부에서는 난방을, 내주부에서

20) Daeuk Shin et al. Development of Evaluation Method for Energy Balancing System in Super-large Complex Buildings, ISES 2011

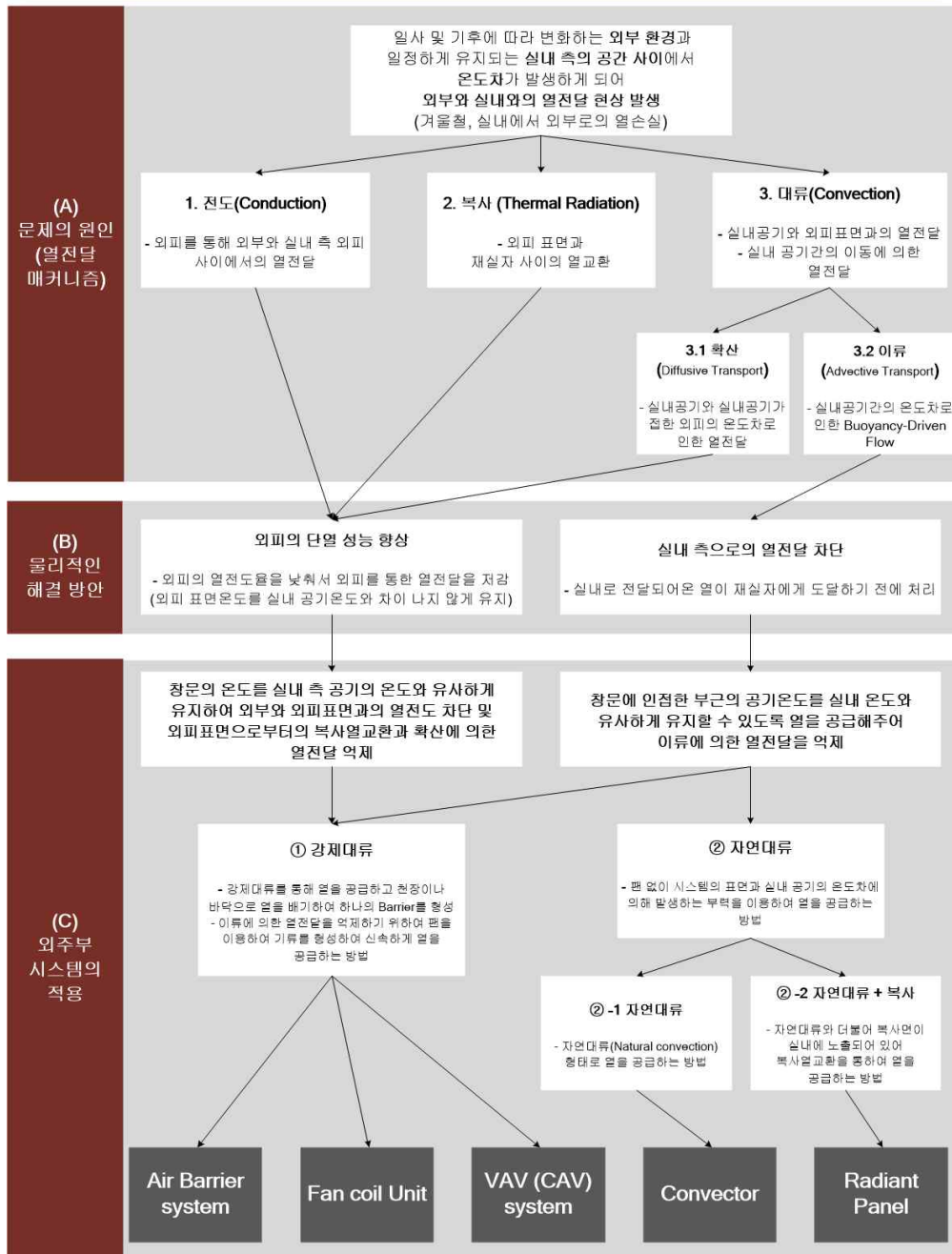
21) Dongwoo Kim et al. Estimation of the Cooling Capacity of Radiant Ceiling Panel (RCP) using Experimental Method, The 1st Seminar on Renewable Energy and Indoor Air Environment for Comfort and Energy Conservation in Buildings, 2014

는 냉방을 해주기 때문에 난방 시에 공급되는 온열과 냉방 시에 공급되는 냉열이 실내에서 혼합되어 각 zone에 요구되는 열량 이상의 에너지를 소비할 수 있다. 또한 건물 외주부에 강제대류 시스템을 적용할 경우에는 열쾌적성 관점에서도 문제가 발생할 수 있다. 강제대류 시스템은 따뜻한 공기의 공급을 통해 냉각된 공기의 가열 효과 및 하강기류의 상승효과가 높지만, 고온이나 저온의 기류를 토출하여 불쾌감을 줄 수 있고, 실내 공간을 점유하는 면적이 큰 강제 대류 시스템의 문제를 보완할 수 있는 시스템에 대한 요구가 증가하고 있다.

따라서 건물 외주부에서의 열쾌적성을 확보할 수 있는 이상적인 방법은 적정 수준의 단열성능을 갖춘 창문을 적용하였을 경우에도 실내공간을 점유하지 않고, 냉각된 공기를 가열하여 창문 및 창문에 근접해 있는 공기의 온도를 상승시키는 것이라 할 수 있다. 이러한 개념으로 접근을 하면 창 및 창에 근접해있는 공기를 따뜻하게 해줄 수 있는 자연대류 열전달과 더불어 창문과의 복사열교환을 통해 외피의 온도를 상승 시킬 수 있는 복사 난방 패널의 적용이 건물 외주부의 열쾌적성 위해 가능한 이상적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 복사 난방 패널은 차가운 공기에 열을 직접적으로 공급하는 것이 아니라, 자연 대류의 원리에 의한 차가운 기류와의 열교환 및 복사 난방 패널과 창문과의 열교환 효과로 열쾌적성을 향상시키고자 하기 때문에 복사 난방 패널이 가장 이상적인 방법이라는 것은 물리적인 현상을 개념적으로 고찰한 결과일 뿐, 실제 적용 시에도 이러한 효과가 명확하게 나타나는지에 대해서는 검토가 필요하며, 이에 대해 향후 시뮬레이션을 통하여 평가하고자 한다.

이와 같은 건물 외주부의 실내외 열교환에 의해 나타나는 열적 특성 및 외주부에 적용 가능한 시스템의 특성을 정리하면 [Figure 2.3]과 같다.

외주부의 열전달 매커니즘에 따른 적용 가능한 시스템



[Figure 2.3] Thermal characteristics of perimeter system

2.1.2 외주부에서의 열쾌적성 평가 방법

열쾌적이란 건물의 재실자가 열적 중립 상태 (Thermally neutral status)에 있어서 실온이 더 높아지거나 낮아졌으면 하는 요구가 없는 상태를 의미한다.²²⁾ 이러한 열쾌적에 대한 평가 방법은 크게 Heat-balance approach와 adaptive approach로 나눌 수 있는데, Alison²³⁾의 연구에서는 이 두 가지 방법에 대해 ‘The heat-balance approach uses data from climate chamber studies to support its theory, best characterized by the works of Fanger while the adaptive approach uses data from field studies of people in building’로 구분하여 정의하고 있다.

Heat-balance approach는 1,296명의 덴마크 학생들을 대상으로 정상상태 조건의 climate chamber 에서 진행된 Fanger의 실험²⁴⁾에서 제시된 것으로 Heat-balance approach의 목적은 정상상태의 열쾌적모델 (steady-state thermal comfort models)의 개발하는 것에 있었다. 따라서 개인적 변수 (착의량, 활동량)는 재실자의 Task에 따라 결정되며, 일반적으로 고정되는 것으로 가정하였으며, 정상상태의 열쾌적 모델을 개발하여 활용하는 가장 큰 이유는 실내 상태에 재실자가 원치 않는 물리적 요소(실내온도, 복사온도, 기류, 습도 등)가 있을 때, 그것을 조절할 경우 재실자의 쾌적성에 영향을 미칠 수 있어 열쾌적 상태에 대한 정확한 판단을 할 수 없기 때문이다. ²⁵⁾

그러나 정상상태 조건의 실에서 물리적인 요소로 열쾌적을 판단하는

22) B.W.Olesen et al., Thermal comfort in a room heated by different methods, ASHRAE Transactions 86, 1980

23) Alison G, Kwok, Nicholas B, Rajkovich. Addressing climate change in comfort standards, Building and Environment 45, 2010 pp18-22.

24) P.O. Fanger, Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering, Danish Technical Press, 1970

25) Heidari, S., Thermal comfort in Iranian courtyard housing, Ph.D thesis, Ther university of Sheffield, 2000

Heat-balance approach는 시간에 따라 계속 변화하는 실제 환경을 반영하지 못하여 건물 재실자의 열쾌적성을 제대로 반영하지 못한다는 주장들²⁶⁾²⁷⁾이 등장하였고, 이에 따라 재실자의 행동 등에 따라 변화하는 실제 환경에서의 실험 데이터를 바탕으로 열쾌적성을 평가하는 adaptive approach가 제시²⁸⁾되었다.

Adaptive approach는 재실자의 행동 등에 따라 변화하는 실제 환경에서의 실험 데이터를 바탕으로 재실자의 열쾌적성을 평가하는 것으로 정의²⁹⁾할 수 있으며, 외부 환경의 영향을 받는 실제 상황 (real world)에서의 열쾌적성을 평가하는 것을 목표³⁰⁾로 한다. 특히, 외기온도와 쾌적 온도와의 관계성을 연구하여 열대기후, 건조기후, 온대 기후 등의 다양한 기후조건에서의 쾌적 조건을 도출하기 위한 다양한 연구³¹⁾³²⁾³³⁾³⁴⁾가 진행되고 있으며, 이러한 기후조건의 특성에 따른 쾌적온도를 제시하고 있다.

그러나 Adaptive approach에서 제시되는 쾌적성은 냉난방 공조를 하지 않고 자연환기를 활용하는 건물에서의 쾌적온도를 제시하는데 초점이 맞추어져 있다. 그리하여 Heat-balance approach에 비해 자연환기가 이루어지는

26) M.A. Humphreys, Outdoor temperature and comfort indoors, Building Research and Practice, 1978

27) Schiavon S, Melikov AK, Energy saving and improved comfort by increased air movement, Energy and Buildings 40, 2008, pp1954-1960.

28) M.A. Humphreys, An adaptive approach to thermal comfort criteria, the economy and society, 1997

29) Ibid.

30) Nicol JF, Thermal comfort - a handbook for field studies toward an adaptive model, University of East London, 1993

31) De Dear RJ et al., Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and Buildings, 2002

32) Busch JF., Thermal responses to the Thai office environment, ASHRAE Transaction, 1990

33) Ealiwa, MA., et al., Field investigation of thermal comfort in both naturally and mechanically ventilated buildings in Ghadames , Indoor Air 99, 1999

34) Schiller GE., Comparison of measured and predicted comfort in office buildings, ASHRAE Transaction 1990, 1990

건물에서는 재실자 쾌적성을 보다 정확하게 반영하여 평가하고 있는 것처럼 보이지만, adaptive approach 연구의 결과에 대해서도 많은 의문이 존재한다. 예를 들어, adaptive approach는 쾌적 범위를 좀더 넓게 가져가기 때문에, 쾌적 범위를 한계(여름철에는 경계선에 가장 가까운 높은 온도, 겨울철에는 경계선에 가장 가까운 낮은 온도)에 맞춰서 적용하여 건물에서의 에너지 절약을 유도하고 이에 대한 근거로 adaptive approach를 활용한다는 주장도 제기³⁵⁾되고, 외부 뿐만이 아니라 내부발열 등과 같이 건물의 실제 환경 조건을 반영하는 다양한 요소들을 고려하고 있지 않으므로 Heat-balance approach의 대표적인 사례인 PMV/PPD를 이용한 평가보다 정확성이 떨어진다는 주장³⁶⁾도 있다.

실제 학계에서는 Adaptive approach를 활용한 M.A. Humphreys의 연구에서 Field Test를 통하여 PMV-PPD 모델 검증에 검증하여 실제 실험 결과와 PMV-PPD 모델 사이에 차이(Discrepancy)가 발생했다는 연구를 발표³⁷⁾하자, PMV-PPD를 연구하는 P.O. Fanger가 부실한 입력 데이터(poor data input)로 인해 M.A. Humphreys의 연구 결과에서 PMV-PPD 모델 사이에 차이가 발생하였으며, 실제 건물에서는 PMV-PPD 모델이 재실자의 열쾌적성을 평가하는데 더 정확하다는 논문을 발표³⁸⁾하였다.

그러나 이와 같은 두가지 접근 방법은 서로 평행선에 위치한 개념이 아니라, 각각의 장점을 조합하고 한계점을 보완하여 열쾌적성을 평가할 수도 있다. Dutch ATG guideline³⁹⁾에서는 Heat-balance approach의 Fanger 모델

35) Goosang joe. Op. cit., CLIMA 2013

36) Yoonkyu Seo et al. Indoor, Thermal Comfort Characteristic Of The Living Space Of College Students, International Journal of Applied Engineering Research, 2011

37) M.A. Humphreys, Thermal comfort requirements, climate and energy, The Second World Renewable Energy Congress, 1992

38) P.O. Fanger, How to apply models predicting thermal sensation and discomfort in practice, The Building Research Establishment, 1994

39) Stanley Kurvers et al, A field study of the performance of the Dutch Adaptive

을 기반으로 개발된 Weighted Temperature Exceeding Hours method (GTO)가 다양한 건물 타입 적용되지 못하는 단점을 극복하고자, Adaptive Temperature Limits guideline(ATG) 새로 개발하였다. 그리하여 건물 타입을 선정하고, 그 타입에 맞는 쾌적온도 계산 수식 및 쾌적온도 범위를 제시하였다.

열쾌적성을 평가함에 있어서는 외기 온도 뿐만이 아니라 건물에 적용된 냉난방 시스템의 특성 및 실의 내부발열, 재실밀도 등과 같은 요소도 같이 고려하여 쾌적성을 판단해야 할 것이다. 왜냐하면 열쾌적성을 판단하기 위해 고려해야 할 물리적 변수들은 아직도 많이 남아있다. 이에 본 연구에서는 복사 난방 패널의 통해 건물의 냉난방이 이루어지는 실내 공간 (내주부와 외주부 등)을 대상으로 열쾌적성을 평가하므로, 이에 적합하다고 판단되는 Heat- balance approach를 기본으로 하여 열쾌적성 요소를 도출하고 이를 평가하고자 한다. 그러나 실외 기후 조건 및 그에 따른 복사 난방 패널의 방열량, 실내 환경 조건인 내부발열, 재실밀도 등에 따른 재실자의 열쾌적성 변화도 분석해야 하는데 이는 Heat-balance approach만으로는 충분하지 않을 수 있으므로 adaptive approach의 ATG의 접근 방법을 참고하여 향후 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하는데 adaptive approach의 개념도 활용해야 한다.

이와 같은 건물에서 열쾌적성을 평가하는 방법을 기본으로 외주부에서의 열쾌적성 평가방법을 분석하면 다음과 같다.

건물의 외주부는 외부 환경에 직접적인 영향을 받아 실내 온열환경을 형성하는데 직접적인 작용을 하게 되어 재실자의 열쾌적에 민감하게 적용하는 공간이다. 따라서 재실자의 쾌적성을 확보하기 위해서는 건물 외주부에서

Temperature Limits guideline, Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors

발생할 수 있는 불쾌적의 원인을 찾고 이를 저감할 수 있어야 한다. 앞서 2.1.1절에서 도출한 결과에 따르면, 실내 공기보다 온도가 낮은 외기로 인해 실내에서 외부로의 열손실이 나타나게 되며, 이에 따라 벽체에 비해 상대적으로 열관류율이 높아 외부로의 열손실이 심한 창문에 근접해있는 공기는 차가운 창문의 영향을 받아 냉각되면서 하강하게 된다. 이와 같은 현상이 발생하면 차가운 창문과 재실자 사이의 복사열교환 및 창문에 근접해 있는 공기가 차가운 창문에 열을 빼앗겨서 냉각됨에 따라 창문 측면에서 냉각된 공기가 하강하여 재실자에게 직접 도달하게 되어 도달된 공기와 재실자의 사이의 대류 열교환이 나타나서 재실자의 불쾌적을 유발할 수 있다. 따라서 건물 외주부 시스템을 통해서 창문의 온도를 실내 측 공기의 온도와 유사하게 유지하여 외피표면으로부터의 복사열교환 및 확산에 의한 열전달을 억제하고 창문에 인접한 부근의 공기온도를 실내 온도와 유사하게 유지할 수 있도록 공기를 공급해주어 이류에 의한 열전달을 억제해야 한다.

이러한 현상을 정리하면 크게 ① 차가운 창문과 재실자 사이의 복사 열교환 현상 및 ② 차가운 기류와 재실자 사이의 대류 열교환 현상으로 구분할 수 있으며, 건물 외주부의 열쾌적 평가 시에 이러한 현상을 발생시킬 수 있는 요소를 고려해야 한다. 차가운 창문과 재실자 사이의 복사 열교환 현상은 cold radiation effects로 인한 복사불쾌적으로 정의할 수 있으며, 차가운 기류와 재실자 사이의 대류 열교환 현상은 downdraft 및 infiltration으로 정의할 수 있다. 또한 차가운 창문에 의한 불쾌적을 연구한 기존 연구⁴⁰⁾에서도 창문으로 인해 재실자가 불쾌감을 느끼는 원인으로 downdraft와 cold radiation effects 그리고 Air leakage of the window(Infiltration)를 제시하고 있다.

40) Peter Lyons et al, Window Performance for Human Thermal Comfort, 2000 ASHRAE Winter Meeting, 2000

이에 본 연구에서는 이와 같은 세 가지 요소를 외주부의 열쾌적 평가를 위한 요소로 선정하여 연구를 수행하고자 한다. 그러나 재실자는 차가운 창문에서의 cold radiation effects를 downdraft나 infiltration에 의한 불쾌감으로 착각하기도 한다.⁴¹⁾ 따라서 각각의 요소에 대한 개념 및 평가 기준을 명확하게 구분하여 연구를 수행하고자 하였다.

위와 같은 결과로 보면, 건물 외주부에서의 열쾌적 평가 시에 고려해야할 요소는 downdraft, infiltration 그리고 cold radiation effect이며, 본 절에서는 이러한 요소에 대한 개념 및 평가 기준을 다음과 같이 제시하였다.

(1) Downdraft

겨울철 창에 근접해있는 실내 공기는 차가운 창문의 영향을 받아 냉각되면서 하강하게 된다. 이로 인해 발생된 기류가 재실자의 피부에 직접 닿게 되면, 피부로부터의 열을 빼앗겨 재실자가 국부적인 냉각효과를 받게 되어 한기나 불쾌감을 느낄 수 있게 되는데 이러한 현상을 downdraft라 한다.⁴²⁾

(가) Downdraft의 개념

Downdraft에 대해서 다양한 연구가 수행되어 왔으며, <Table 2.2>와 같이 각 연구의 목적에 따라 downdraft 현상을 정의하고 그에 대한 분석을 수행하였다.

Downdraft 및 이와 관련된 용어와 정의에 대해 분석한 결과 downdraft는 인체의 국부적인 냉각 (cooling)에 따른 불쾌적 현상으로 ‘차가운 창문 표면’에 의해 발생한 ‘차가운 공기’의 ‘자연 대류 하강 흐름’에 의한 기류 현상이

41) Ibid.

42) Goosang Joe et al. Downdraft assessment of Glass Curtain wall Building with a Radiant Floor Heating System, Applied Sciences 7(10), 2017 pp99-121

라 할 수 있다. 그리고 downdraft와 관련된 용어인 draft 또는 draught는 기류 현상에 의한 인체의 국부적인 냉각 (cooling) 및 가열 (heating)에 따른 불쾌적 현상 전체를 의미한다. 따라서 draft는 차가운 기류에 의한 불쾌적 뿐만이 아니라, 외주부 시스템 중 FCU나 Convectector와 같은 시스템의 디퓨저 등에서 토출되는 차갑거나 따뜻한 강제 대류에 의한 기류의 흐름 등 다양한 원인에 따른 불쾌적 현상을 모두 포함한 개념을 의미하며, downdraft는 draft에 포함되는 개념이라 볼 수 있다.

이에 본 연구에서는 ‘차가운 창문 표면(cold surfaces, glazed surfaces in winter)’에 의해 발생한 ‘차가운 공기(cold stream of air)’의 ‘자연대류 하강 흐름(cold natural convective flows, cold air draining off the window surface)’에 의해 ‘재실자의 불쾌적(discomfort)’이 발생하는 것으로 정의하여, 복사 난방 패널이 적용된 건물 외주부 공간에서 이러한 현상에 대한 평가를 수행하고자 한다.

〈Table 2.2〉 Various definition of downdraft

Term	Definition	Source
Draft	Any localized feeling of coolness or warmth of any portion of the body caused by both air movement and air temperature, with humidity and radiation considered constant	Koestel and Tuve(1955), Reinmann (1959)
Draught, Draft, Draught	An unwanted local cooling of the human body caused by air movement	P. O. Fanger (1988)
Downdraft	the problem caused by the cold natural convective flows from cold surfaces	Heiselberg (1994)
Downdraft	discomfort risk resulting from cold air draining off the window surface	Peter Lyons (2000)
Downdraft	The cold stream of air created by the temperature between the room air and the surface of the window	U Larsson (2002)
Draught	During the winter period the natural convection flow along a cold window surface can be the cause of thermal discomfort	Miroslaw Zukowski (2007)

(나) Downdraft의 평가 기준 및 방법

본 절에서는 국내외 연구 문헌 및 국외 기준 등을 조사하여 downdraft의 평가 기준 및 방법을 분석하였다. Downdraft로 인한 재실자의 쾌적성을 평가하는 기준은 실내의 온도가 일반적인 범위 내에 존재할 때 허용 가능한 평균 기류속도를 통하여 평가하는 방법과 실내의 전반적인 쾌적을 평가하기 위한 지표인 PMV나 PPD를 활용하는 방법, 그리고 draft로 인한 국부적인 불쾌감을 평가하기 위한 지표를 활용하는 방법이 있다.

Downdraft는 정성적(定性的)인 인체의 느낌에 관한 문제이기 때문에 앞서 제시된 세 가지 방법을 적용 할 경우, 적용된 기준의 엄격성에 따라 <Table 2.3>과 같이 ‘기준이 되는 일반적인 기준보다 좀 더 엄격한 범위’, ‘일반적인 기준에 따라 통용될 수 있는 범위’ 그리고 ‘일반적인 기준보다 완화된 범위’의 세 가지 단계로 구분하여 적용하고 있다.

실내의 온도가 일반적인 범위 내에 존재할 때 허용 가능한 평균 기류속도를 통하여 평가하는 방법은 ISO 7730⁴³⁾에서 [Figure 2.4]와 같이 건물의 용도에 따라 실내의 작용 온도가 일반적인 범위 내에 존재할 때 허용 가능한 평균 기류 속도를 제시하고 있다.

<Table 2.3> Class level for assessment of thermal comfort

Class	Description
A	It is desired to adhere to higher than typical comfort standards
B	Typical applications and should be used when other information is not available
C	It is desired to relax the typical comfort standards

43) ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2013

이때 작용온도(OT, Operative Temperature) 기준은 일반적인 수준의 활동량 (1met)으로 여름철(냉방 기간)에는 착의량 0.5clo, 겨울철(난방 기간)에는 착의량 1.0clo를 기반으로 하고 있다. 그리고 평균 기류 속도의 기준에서 난류강도는 혼합 환기(mixing ventilation)일 때인 40%가 적용되었다.

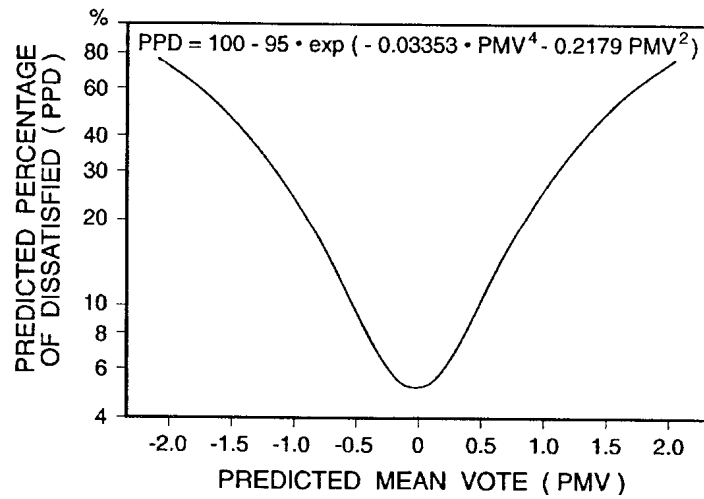
실내의 전반적인 쾌적을 평가하기 위한 지표인 PMV나 PPD를 활용하는 방법은 몸 전체에서 매우 춥거나 더운 느낌을 느껴 열적으로 불쾌적을 느낄 수 있는 사람의 비율을 예측하는 지표인 PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)를 활용한다. PPD는 [Figure 2.5]와 같이 PMV의 함수로서 PMV내에서의 쾌적범위를 동시에 평가할 수 있으며, 이때의 쾌적 범위는 <Table 2.4>와 같다.

Type of building/space	Activity W/m ²	Category	Operative temperature °C		Maximum mean air velocity ^a m/s	
			Summer (cooling season)	Winter (heating season)	Summer (cooling season)	Winter (heating season)
Single office	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Landscape office		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Conference room						
Auditorium		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 ^b
Cafeteria/restaurant	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 ^b
Classroom						
Kindergarten						
Department store	93	B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 ^b
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 ^b
		A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 ^b

^a The maximum mean air velocity is based on a turbulence intensity of 40 % and air temperature equal to the operative temperature according to 6.2 and Figure A.2. A relative humidity of 60 % and 40 % is used for summer and winter, respectively. For both summer and winter a lower temperature in the range is used to determine the maximum mean air velocity.

^b Below 20 °C limit (see Figure A.2).

[Figure 2.4] Design criteria for type of building/space



[Figure 2.5] PMV-PPD

<Table 2.4> Range for general thermal comfort

Class	PPD	PMV Range
A	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

마지막으로 draft로 인한 국부적인 불쾌감을 평가하기 위한 지표를 활용하는 방법에는 Draft rate와 EDT를 활용하는 방법이 있다. 이 두 가지 지표는 실내 기류의 온도와 속도에 따른 평가를 할 수 있으므로, downdraft 평가에 가장 많이 활용되고 있다.

Draft rate은 인체의 국부적인 불쾌감을 평가하는 열쾌적 지표로 기류 속도(air velocity), 공기 온도(air temperature), 난류강도(turbulence intensity), 활동량(대사율, metabolic rate), 착의량(clothing insulation)에 의해 영향을 받는다.⁴⁴⁾

여기서 Draft rate과 PPD의 차이는 Draft rate에서는 난류 강도를 고려한
다는 점인데 난류강도(Tu)란 평균 기류 속도(v)와 기류 속도의 표준 편차
(SD_v)의 비율을 의미하는 것으로 다음과 같은 식 (2.1)과 같이 나타내어진
다.⁴⁵⁾

$$Tu = (SD_v/v_a) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Tu : Local turbulence intensity [%]
 v_a : Local mean air temperature [m/s]
 SD_v : Standard deviation of local mean air temperature [m/s]

P. O. Fanger의 연구⁴⁶⁾에 따르면 동일한 공기 온도 및 기류 속도인 환경
에서 난류 강도가 낮은 경우보다 높은 경우에 downdraft를 더 심하게 느낄
수 있다는 연구 결과가 있다. 그러나 난류 강도는 주로 기류 속도의 영향을
많이 받아 자연 대류로 인한 기류를 평가할 경우에는 그 값이 작아서 난류
강도에 미치는 영향이 적다는 연구 결과⁴⁷⁾도 있다.

Draft rate을 활용하여 열쾌적성을 평가할 때 활동량 (metabolic rate)은
1.0 - 1.3 met 사이, 착의량 (clothing insulation)은 0.5 - 0.7 clo (lightly
clothed person) 사이의 조건이 적용된다. 또한 차가운 기류에 의한 열쾌적
성은 피부가 옷으로 덮이지 않은 상태일 때 가장 크며, 이러한 신체 부위로
는 머리, 목, 어깨와 다리 부분에 포함되는 발목, 발, 다리 부위 등이 있다.

Draft rate는 식 (2.2)와 같이 계산할 수 있으며, ASHRAE에서는 <Table

44) ASHRAE 55P, Op. cit., 2013

45) Ibid.

46) P. O. Fanger. Air turbulence and sensation of draught, Energy and Buildings, 12,
1988, pp.21-39.

47) Goosang Joe et al. Op. cit., CLIMA 2013

2.5>와 같이 draft rate의 등급을 나누어 기준의 적용성을 3가지 단계로 구분하고 각각의 등급에 따라 draft로 인해 불쾌감을 느끼는 사람의 허용 가능한 비율을 제시하고 있다. draft rate의 값은 보수적으로 계산한 결과로 실제 건물에서 재실자가 불쾌감을 느끼는 비율은 draft rate의 계산결과보다 낮을 수 있다. 그러나 draft rate은 기류 및 온도의 혼합으로 인한 불쾌감을 정량적인 수치로 표현하여 열쾌적성을 평가에 유리하다.

Draft rate 계산 시 인체의 열감각은 중립에 가까운 상태에 활동량은 자리에 앉아서 가벼운 활동 상태를 기준으로 거주 범위(occupied zone)의 많은 부분에서 평균적인 난류강도는 혼합 환기(mixing ventilation) 시 35% 정도이며 치환환기(displacement ventilation)가 적용된 경우나 기계적인 환기가 적용되지 않은 경우(without mechanical ventilation)에는 20% 정도이다.

$$DR = (34 - t_{a,l})(\overline{v_{a,l}} - 0.05)^{0.62} (0.37 \times \overline{v_{a,l}} \times Tu + 3.14) \quad (2.2)$$

- DR : Predicted percentage of people dissatisfied due to draft [%]
 $t_{a,l}$: Local air temperature [°C]
 $\overline{v_{a,l}}$: Local mean air velocity [m/s]
 Tu : Local turbulence intensity [%] (if unknown, 40% may be used)

For $\overline{v_{a,l}} < 0.05\text{m/s}$, use $\overline{v_{a,l}} = 0.05\text{m/s}$
for $DR > 100\%$, use $DR = 100\%$

<Table 2.5> Class level of draft rate

Class	Draft rate
A	< 10
B	< 20
C	< 25

EDT는 실내의 특정한 위치에서 거주자가 국소냉각(draft)를 느끼는지의 여부를 나타내는 척도로, 온도와 기류속도의 조합으로 나타내어지며, 식 (2.3)을 이용하여 계산한다.

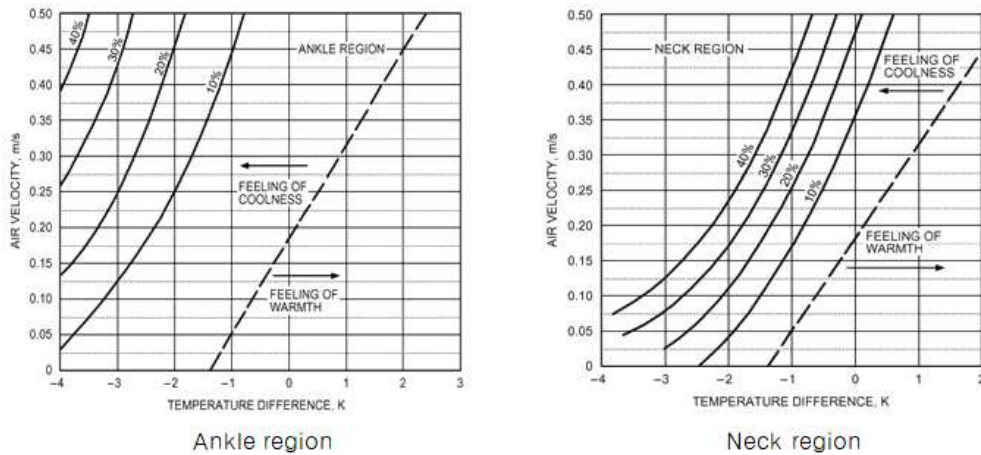
$$T_{ed} = (T_s - T_c) - 8(V_a - 0.15) \quad (2.3)$$

- T_{ed} : Effective draft temperature [K]
- T_s : Local airstream dry-bulb temperature [°C]
- T_c : Average (control) room dry-bulb temperature [°C]
- V_a : Local airstream centerline velocity [m/s]

EDT는 주어진 draft 조건에서 불쾌감을 느끼는 실안의 재실자 비율을 통계적으로 설명할 수 있는 데이터를 제시⁴⁸⁾한다. 일반적으로 $-1.5 < EDT < 1.0$ 를 사이클 쾌적 범위로 판단 (ADPI 계산 시의 적용 범위)하며, [Figure 2.6]과 같이 인체의 노출 부위에 따라 다른 기준 범위를 제시한다. 그러나 EDT는 주로 강제대류 시스템인 Air diffuser 설계 시 실내 온열 환경을 평가할 때 활용하는 지표로 자연 대류의 원리를 이용하는 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하기에는 적합하지 않을 수 있지만, 재실자의 쾌적성이 cooling에 가까운지 Heating에 가까운지에 대해서는 판단 가능하다.

이에 본 연구에서는 실내 공간에서 특정 영역에서의 기류 속도와 온도 분포에 대한 고려 및 난류강도의 영향까지 반영하여 기류에 대한 세밀한 평가가 가능한 draft rate(DR)을 downdraft 평가의 주된 지표로 선정하여 열쾌적성 평가에 활용하고자 하며, 필요에 따라 EDT는 참고할 수 있는 지표로 활용하고자 한다.

48) ASHRAE Handbook, Op. cit., 2013



[Figure 2.6] Criteria of effective draft temperature

기류의 영향으로 인한 쾌적성을 평가할 때 활용하는 Draft rate의 계산은 건물에서 재실자의 쾌적성을 최대한 확보하기 위해 보수적으로 계산한 값이므로, 실제 환경과 비교했을 경우에는 draft rate의 계산값이 재실자의 불쾌적성을 과대평가하는 경향이 있다.⁴⁹⁾ 그러나 draft rate은 정성적인 인체의 느낌을 수식화하여 표현해 주므로 공학적인 판단을 하기에 유리하며 외주부 시스템간의 비교 평가를 하기에에도 유용하다. 또한 인체의 열쾌적성을 보수적으로 평가한 지표이기 때문에 draft rate값이 기준 범위를 충족시키면 실제 환경에서는 이보다 열쾌적성이 우수할 것이라는 판단도 가능하므로 본 연구에서 복사 난방 패널의 downdraft 평가 시 적합한 지표라 할 수 있다.

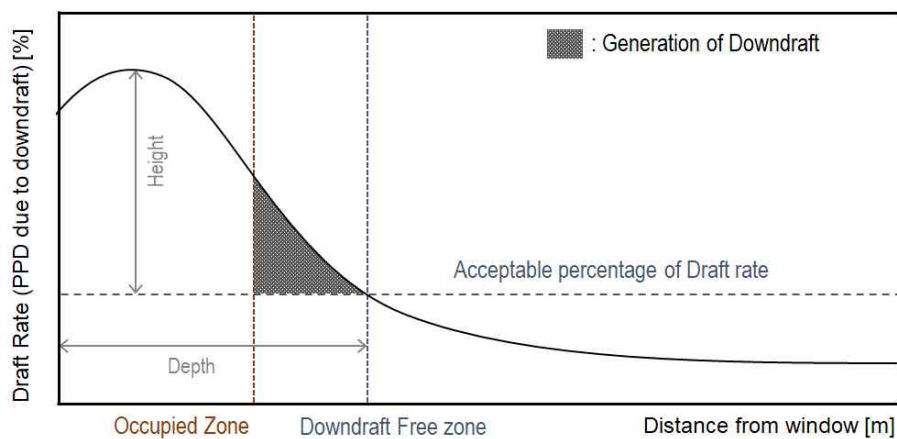
Downdraft의 발생은 [Figure 2.7]과 같이 draft rate의 높이와 너비로 판단 가능한데, 여기서 downdraft의 높이는 위의 그래프에서 Y축의 길이, downdraft의 너비는 허용 가능한 기준 이상까지의 X축 길이를 의미한다. 차가운 창문의 영향을 받게 되는 난방기의 draft rate의 흐름을 분석해보면,

49) Jorn Toftum et al. Human Response to Air Movement—Evaluation of ASHRAE's Draft Criteria (RP-843), HVAC & R Research 9, 2003, pp187-202.

창문 근처에서는 하강기류로 인해 기류 속도가 높게 나타나고, 공기 온도는 낮게 분포하므로 draft rate 수치는 높게 나타나지만 실내로 기류가 유입될 수록 축열되는 있는 실의 특성이나 외주부 시스템의 적용 등으로 인해 차가운 기류를 저감하게 되므로 draft rate의 수치는 점차 낮아진다.

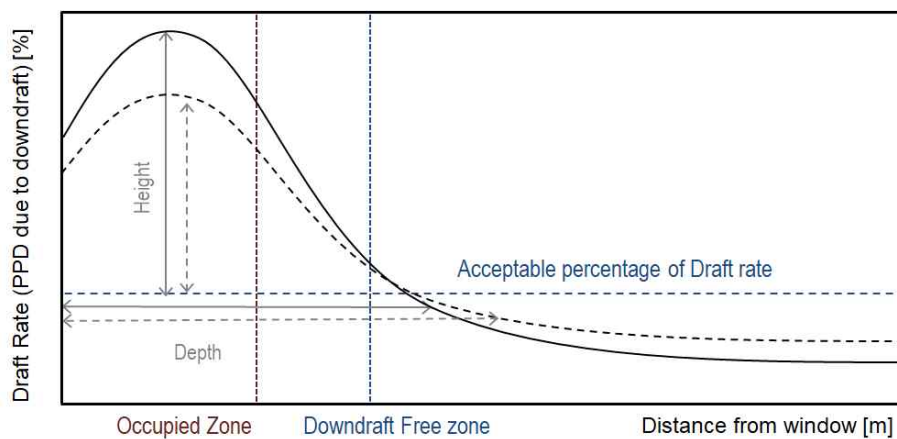
따라서 draft rate의 수치가 재실 영역 내에서 허용 가능한 기준 수치 이상으로 발생하지 않기 위해서는 draft rate 수치가 높게 나타나는 부분의 절대적인 ‘높이(height)’도 중요하나 draft rate 수치가 허용 가능한 기준 수치 이상으로 높게 나타나는 부분이 재실 영역을 침범하지 않기 위해서는 draft rate의 수치가 감소하면서 허용 가능한 범위보다 낮아지는 부분의 ‘깊이(depth)’도 중요하다. 만약 draft rate의 수치의 높이가 허용 가능 기준 수치보다 높더라도 높은 수치의 영역이 재실 영역 외에서만 나타나고 재실 영역 내에서는 draft rate가 허용 가능 기준 수치보다 낮게 나타난다면 downdraft가 발생하지 않았다고 할 수 있다.

Downdraft는 인체의 정성적인 느낌에 따라 불쾌감을 느끼게 되는 현상이므로, 결국 차가운 기류로 인한 재실자의 불쾌감을 저감하는 것이 중요하다.



[Figure 2.7] Prediction of draft rate distribution

즉, 비재실영역에서는 downdraft를 저감하기 위한 다양한 방법이 이루어져야 하는 공간이며, 여기서의 draft rate값은 상대적으로 중요도가 낮다고 볼 수 있다. 따라서 downdraft를 저감하기 위한 영역으로 사람이 장시간 활동하는 재실 영역을 평가 대상 공간으로 선정하였다. 이때, 창문 근처에서 draft rate의 높이가 허용 가능한 기준 수치보다 높게 나타나더라도 재실 영역 내에서는 draft rate가 허용 가능 기준 수치보다 낮게 나타난다면 downdraft가 발생하지 않는 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 downdraft의 발생은 [Figure 2.8]과 같이 두 가지 흐름으로 구분하여 특징지을 수 있다. 하나는 비재실영역에서 높은 draft rate을 보이지만 이러한 수치가 재실영역으로 갈수록 가파르게 감소하는 경우이며, 또 하나는 초기에 나타난 draft rate의 수치가 서서히 감소하는 경우이다. 이러한 특징에 따르면, downdraft의 저감을 위해서는 downdraft가 발생하는 높이(height)를 줄여서 재실영역으로 유입되는 차가운 기류의 흐름을 감소시키거나, downdraft가 발생했을 때, 기준점 이하까지 내려가는 지점의 위치 즉, 깊이(depth)를 줄여서 마찬가지로 차가운 기류의 재실 영역 유입을 사전에 차단해야 한다.



[Figure 2.8] Change of predicted draft rate distribution

강제 대류 시스템같이 창문 근처에서 고온의 강한 기류로 열을 공급하는 방식은 높은 온도와 기류 속도로 인해 [Figure 2.8]과 같이 비재실영역에서 draft rate의 height는 높지만 비재실영역에서 차가운 공기에 열을 최대한 공급하기 때문에 기준점 이하까지 내려가는 depth를 감소시켜 downdraft를 저감한다. 한편, 자연 대류 시스템은 차가운 공기에 열을 서서히 공급하기 때문에 height는 상대적으로 낮지만 depth가 증가될 수 있다. 특히 복사 난방 패널의 경우에는 좁은 면적에서 높은 온도로 방열을 하면 height는 높고 depth는 작을 수 있으며 넓은 면적에서 상대적으로 낮은 온도로 방열을 하게 되면 height는 낮고 depth가 넓을 수 있다.

앞서 언급하였듯이 차가운 기류가 재실영역으로 유입되지 않는 것이 가장 중요하기 때문에, 비재실영역에서의 height가 높다 하더라도 재실영역으로 차가운 기류가 유입되지 않으면 상관없으나, 높은 height의 감소폭이 작아 depth의 위치가 증가하게 되면 downdraft로 인한 재실자의 불쾌감이 발생한다. 마찬가지로 비재실영역에서의 height이 낮더라도 draft rate값이 감소하지 않아 재실영역에서의 downdraft로 인한 재실자의 불쾌감이 발생할 수 있는 상황도 있다. 따라서 이러한 downdraft의 경향 및 저감 가능성을 판단할 수 있도록 본 연구에서는 decay ratio of downdraft라는 개념을 제시하여 downdraft의 저감 가능성을 평가하고자 하였다. decay ratio는 식 (2.4)와 같이 비재실영역에서 발생하는 downdraft의 최대 height와 실의 전체 너비 중 draft rate값이 기준점 이하로 감소하기 시작하는 depth와의 관계를 제시한 개념으로 decay ratio가 작을수록 draft rate의 값을 신속하게 낮추거나 (비재실영역에서는 높은 height를 나타내었지만, draft rate이 재실영역으로 갈수록 현저하게 감소한 경우에 해당) draft rate의 값 자체가 작게 발생(차가운 기류에 열을 천천히 그리고 꾸준히 공급하여 draft rate이 작게 형성된

경우에 해당) 했으므로 downdraft로 인한 재실자의 불쾌감을 저감할 가능성이 높다고 할 수 있다.

$$Decayratio = \left(\frac{DR_{criteria}}{DR_{startingpoint}} + \frac{P_{depth of room} - P_{depth of dr}}{P_{depth of room} - P_{depth of perizone}} \right) \times \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

- $DR_{criteria}$: Selected draft rate criteria by class level [%]
 $DR_{startingpoint}$: Value of draft rate when the occupation arear is starting [%]
 $P_{depth of room}$: Depth of the room [m]
 $P_{depth of perimeter zone}$: Depth of the perimeter zone [m]
 $P_{depth of dr}$: Distance from window when the draft rate falls below criteria [m]

(2) Infiltration

Infiltration은 외부의 기류가 건물 외피(창문)의 틈새로 유입되어 재실자의 불쾌감을 유발하는 현상이다. 최근 건물의 기밀성이 강화되고 기준이 높아짐에 따라 infiltration은 점점 감소하는 추세⁵⁰⁾지만, infiltration이 재실자의 불쾌감을 유발하거나, 차가운 기류의 흐름에 영향을 줄 수 있으므로 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 열쾌적성 평가 시에 고려하지 않을 수 없는 요소이다. Infiltration에 대한 평가는 infiltration을 단독으로 평가하기 보다는 downdraft와 같이 고려하여 평가하는 것이 유리하다. 즉, 앞서 제시된 downdraft의 정의인 ‘① 차가운 창문 표면(cold surfaces, glazed surfaces in winter)’에 의해 발생한 ‘② 차가운 공기(cold stream of air)’의 ‘③ 자연대류 하강 흐름(cold natural convective flows, cold air draining off the window surface)’에 의해 ‘④ 재실자의 불쾌적(discomfort)’이 발생하는 것 중에서 infiltration은 ②와 ③을 형성하여 ④를 유발할 수 있기 때문이다.

50) Goosang Joe, Op. cit., pp99-121.

〈Table 2.6〉 Example of downdraft occurrence

Parameters	Situation	Occurrence of downdraft	
①, ②, ③	차가운 창문 표면에서 차가운 기류가 하강하여 재실영역으로 유입됐다		X
①, ②, ③, ④	재실영역으로 유입된 차가운 기류로 인해 재실자가 불쾌감을 느꼈다	○	
①, ②, ③	재실영역으로 차가운 기류가 침입했지만 재실자가 불쾌감을 느끼지는 않았다		X
Infiltration, ④	침기로 인한 차가운 기류가 재실영역으로 유입되어 이로 인해 재실자가 불쾌감을 느꼈다.	??*	

* 본 상황은 downdraft가 아닌, infiltration으로 인한 불쾌감이지만, 본 연구에서는 복사 난방 패널의 외주부 적용시의 열쾌적성을 평가하므로 이를 downdraft로 인한 불쾌감과 동일하게 평가한다.

〈Table 2.6〉에서 제시된 상황과 같이, downdraft와 infiltration은 서로 다른 개념이지만, 실제 draft rate 값을 이용하여 평가하는 경우에는 차가운 기류와 재실자 사이의 대류 열교환 현상에 downdraft에 infiltration의 영향이 동시에 반영되므로, 본 연구에서는 infiltration이 모사된 조건이라 할지라도 이를 downdraft에 포함하여 평가하고자 한다.

(3) 복사불쾌적

복사불쾌적은 차가운 창문과 재실자 사이의 복사 열교환 현상을 평가하는 경우에 고려하기도 하지만, 복사 난방 패널의 적용 시 패널의 표면 온도로 인한 복사불쾌적을 평가하기 위해서도 필요하다.

(가) 복사불쾌적의 개념

복사불쾌적이란 벽체(창문), 천장, 바닥 등과 같은 특정 표면(surface)과 재실자 사이의 복사열교환으로 인하여 재실자가 불쾌감을 느끼는 현상을 의

미한다. 즉, 재실자를 중심으로 주변의 표면 온도차이가 심하면 불쾌감을 유발할 수 있는데 이를 복사불쾌적이라 하며, 불균등복사라는 표현으로도 사용한다. 복사불쾌적은 천장면이나 바닥면에서 방열을 하여 방열면의 표면온도가 높은 복사 난방 패널의 고유한 특성에 의해 발생할 수 있는 불쾌적을 문제이므로, 건물 외주부의 쾌적성 향상을 위해 복사 난방 패널을 적용할 경우, donwdraft와 같은 불쾌적을 저감하기 위해 복사 난방 패널의 표면온도를 높게 적용하더라도 복사불쾌적 문제가 발생하지 않는지 평가해야 하며, 이에 따른 적절한 방열 조건을 설정하여 적용해야 한다.

(나) 복사불쾌적의 기준 및 평가 방법

복사불쾌적에 대한 평가는 허용 가능한 온도범위를 통하여 평가하는 방법과 복사열교환이 이루어지는 표면 사이의 형상계수 (VF, View Factor)를 이용하여 계산하는 방법이 있다.

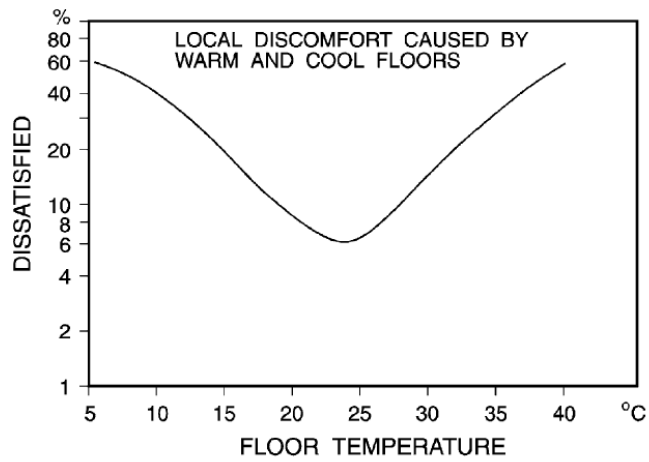
허용 가능한 온도범위를 통하여 평가하는 방법에서는 바닥면의 경우 표면 온도 범위의 한계를 명시하고 있으며, 천장면 및 벽면 등의 경우에는 복사 불균등 온도의 한계를 명시하고 있다. 바닥 표면 온도의 경우, [Figure 2.9]와 같이 바닥표면 온도에 따른 재실자의 불만족정도를 제시하고 있으며, 또한 앉아 있는 경우 (Sedentary subjects) 19-30℃, 서있거나 걷는 경우 (Standing or walking persons) 17-28℃를 제시⁵¹⁾하고 있으며, ASHRAE Standard⁵²⁾, ISO 7730⁵³⁾ 기준에서 바닥 표면의 허용 한계 범위를 19-29℃로 정의하고 있다. 복사불균등 온도의 한계는 서로 마주보는 면의 온도차에 따른 불만족도를 활용하는 것으로 [Figure 2.10]과 같이 차가운 창문, 단열

51) B.W. Olesen, Op. cit., 1990

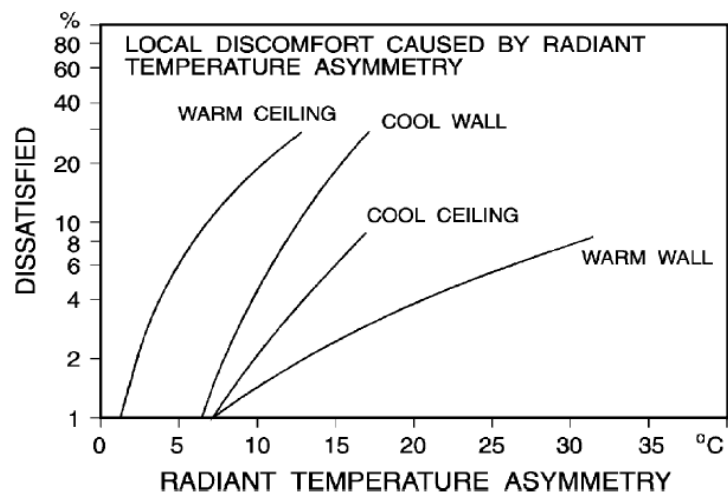
52) ASHRAE 55p, Op cit., 2013

53) ISO 7730 Op cit., 2013

되지 않은 벽체, 차가운 물체, 냉난방패널 등의 온도가 마주보는 면의 온도와 차이가 크게 나타나는 경우에서의 열적 불쾌적함(thermal discomfort) 고려하는 경우에 유리하다.



[Figure 2.9] Limit of floor temperature

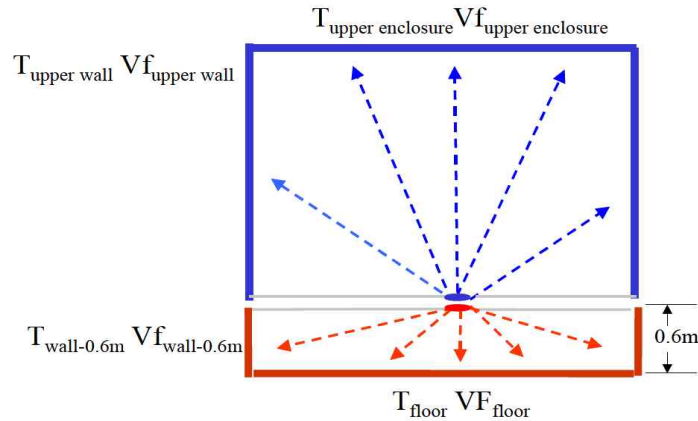


[Figure 2.10] Limit of radiant temperature asymmetry

복사열교환이 이루어지는 표면 사이의 형상계수 (VF, View Factor)를 이용하여 계산하는 방법⁵⁴⁾은 식 (2.5) 및 [Figure 2.11] 과 같다.

이러한 복사불쾌적을 평가하는 경우 지역 및 문화 특성에 따라 실내 쾌적 유지를 위한 복사시스템 한계 표면온도의 범위가 다르게 적용될 수 있으며, 복사시스템이 적용된 공간의 특성 및 복사시스템의 용도에 따라 쾌적 유지를 위한 복사시스템 한계 표면온도의 범위 또한 달라질 수 있다. 따라서 복사 난방 패널의 적용할 경우에는 적용되는 상황에 맞는 기준을 적용해야 하며, 이에 대해서는 복사 난방 패널의 방열 범위를 설정하는 4장에서 상세하게 설명하고자 한다.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{radiant temperature asymmetry}} &= MRT_{\text{upper } 0.6\text{m}} - MRT_{\text{below } 0.6\text{m}} \\
 &= (T_{\text{upper enclosure}} Vf_{\text{upper enclosure}} + T_{\text{upper wall}} Vf_{\text{upper wall}}) \\
 &\quad - (T_{\text{floor}} Vf_{\text{floor}} + T_{\text{wall}-0.6\text{m}} Vf_{\text{wall}-0.6\text{m}})
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

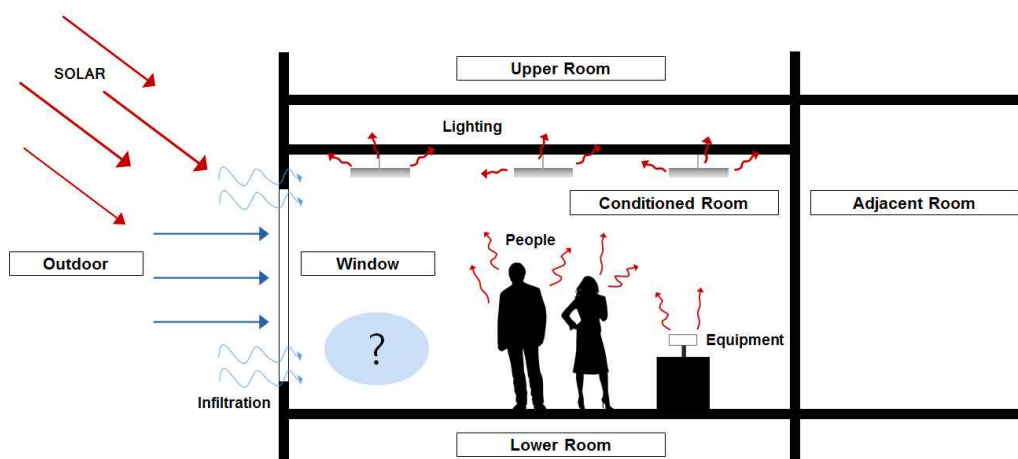


[Figure 2.11] Calculation method of radiant temperature asymmetry

54) Wang, Z., et al. Modeling thermal comfort with radiant floors and ceilings, university of californai, 2009

2.1.3 열쾌적성에 영향을 주는 건물의 실내외 환경 요소

건물의 외주부는 외기에 면하는 부분으로 [Figure 2.12]와 같이 외부로의 열손실⁵⁵⁾, 일사열 등과 같은 부분의 영향을 받지만 인체, 조명, 기기와 같은 내부 발열의 영향도 받게 되고, 이러한 실내외 환경 요소의 영향이 혼합되어 재실자의 열쾌적성을 결정하게 된다. 즉, 건물 외주부의 열쾌적성에는 실내온열환경과 관련된 인체나 조명, 기기와 같은 내부발열체가 결과에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 내부발열에 의해 데워진 공기의 흐름에 따라서 창측의 차가워진 공기에 영향을 주게 되면 이는 곧 downdraft 등과 같은 현상에 영향을 미치게 되어 재실자의 쾌적성에 직결되는 문제이므로 내부발열에 대한 고려가 필요하다. 또한 앞서 설명하였듯이 건물에서의 infiltration은 차가운 기류의 재실영역 유입을 증폭시켜 재실자의 쾌적성에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대해서도 고려해야 한다.



[Figure 2.12] Thermal environment in room

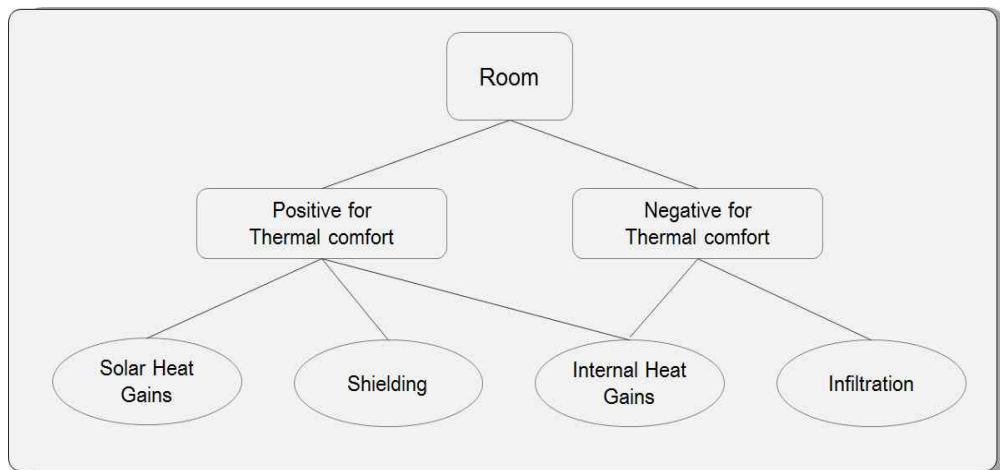
55) 본 연구에서는 난방기를 기준으로 평가하므로 열획득 부분은 고려하지 않았다.

한편, Manz⁵⁶⁾는 내부발열로 발생한 따뜻한 기류는 상대적으로 낮은 유체의 밀도로 인해 상승하여 coanda effect로 인해 천장면을 타고 창문 쪽으로 흘러가 하강하게 되므로, 창문 근처에서의 하강기류를 증폭시켜 downdraft의 발생을 더 심화시킨다는 주장을 제기하였다. 따라서 복사 난방 패널이 적용된 외주부에서의 열쾌적성을 평가하는 경우에는, 건물의 다양한 환경요소를 도출하고 열쾌적성에 긍정적인 요소와 부정적인 요소를 구분하여 재실자의 열쾌적성을 평가해야 한다. 특히, 복사 난방 패널이 적용되는 경우에는 패널의 복사열 효과도 있으므로, 건물의 환경 요소에 일반적인 경우와는 다르게 작용할 수도 있다. 예를 들어, 복사 난방 패널은 재실자와의 복사열 교환으로 인하여 상대적으로 낮은 실내 온도에서도 재실자의 쾌적성을 유지할 수 있지만⁵⁷⁾, downdraft를 저감하기 위해 높은 표면온도로 복사 난방 패널을 방열하게 되면 downdraft로 인한 불쾌감은 저감하더라도 복사불균등으로 인한 불쾌감이 발생할 수 있다. 따라서 외주부의 열쾌적성에 영향을 주는 건물 환경 요소를 도출하고, 도출된 요소에 대한 쾌적성의 영향도를 분석하여 열쾌적성 평가 방법을 정립할 필요가 있다.

재실자의 열쾌적성에 영향을 주는 요소는 [Figure 2.13]과 같다. 건물 외주부의 열쾌적성에 긍정적으로 작용하는 요소는 건물 난방부하 계산 시 부하값에 (-)로 작용하는 요소라 할 수 있으며, 여기에는 Solar heat gain과 Internal heat gain이 있다. Solar heat gain은 외부에서 Internal heat gain 내부에서 실내 및 재실자에 열을 공급해주기 때문에 부하 계산시의 비중이 높을 뿐만 아니라, 난방부하가 발생하는 시기에는 재실자의 열쾌적성을 향상시킬 수 있다.

56) H. Manz et al. Analysis of thermal comfort near cold vertical surfaces by means of computational fluid dynamics, Indoor and Built Environment 13, 2004, pp233-242.

57) Daeuk Shin et al. Application of the Pre-process on a Statistical Method for Reducing the Calculation Period, COBEE 2015



[Figure 2.13] Indoor parameters for thermal comfort assessment

그리고 downdraft로 인한 흐름을 막을 수 있는 shielding도 긍정적인 요소라고 할 수 있지만, shielding은 건물의 인테리어적인 요소이므로 열쾌적성 향상을 위해 적절한 물리적인 해결방법이라 판단하기 어려울 수도 있다.

한편, 내부발열의 경우, 난방부하를 저감시키고, 재실자에게 따뜻한 기류의 흐름 및 복사열교환 효과 등으로 인해서 쾌적성을 향상시킬 수 있지만, 내부발열로 인해 발생한 따뜻한 기류가 천장면으로 상승하여 천장면을 타고 창문 근처로 유입될 경우에는 창문 근처에서 하강하는 기류를 증폭시켜 downdraft의 발생을 심화시킬 수도 있으므로, 외주부에서의 열쾌적성에 부정적으로 작용할 수도 있다.

열쾌적성에 부정적으로 작용하는 요소는 건물 난방부하 계산 시 부하값에 (+)로 작용하는 요소라 할 수 있으며, 여기에는 infiltration이 있다. 앞서 설명하였듯이 infiltration은 건물 틈새로 외부의 기류가 실내로 유입되는 현상으로 infiltration 자체로 인한 불쾌적 유발뿐만 아니라, downdraft를 심화시킬 수 있는 요소이기 때문에 재실자의 열쾌적성에 부정적으로 작용한다.

2.2 열쾌적성 측면에서의 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법

복사 난방 패널을 외주부에 적용하기 위해서는 분할 난방의 형태로 외주부의 부하만 담당할 수 있는 방열량으로 적용하거나, 천장 또는 바닥 전체에 적용하여 내외주부의 부하를 동시에 담당할 수 있는 방열량으로 적용해야 한다. 이와 같은 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법에 따라 건물에서 요구되는 열량이 달라지고, 이는 복사 난방 패널의 열전달 매커니즘과 이에 따른 패널의 방열 특성에 변화를 주어 열쾌적성에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 본 절에서는 복사 난방 패널의 방열 특성과 외주부 적용시 열전달 매커니즘에 따른 방열 특성의 변화 양상을 분석하고, 열쾌적성 측면에서 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 설계 요소를 도출하고자 한다.

2.2.1 복사 난방 패널의 방열 특성

복사 난방 패널은 앞서 설명하였듯이, 복사에 의한 열전달과 대류에 의한 열전달로 열을 공급하는 시스템으로 ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment⁵⁸⁾에서는 복사패널의 방열량은 다음 식 (2.6)과 같이 복사에 의한 열전달량과 자연대류에 의한 열전달량의 합으로 제시하였다.

$$q = q_r + q_c \quad (2.6)$$

- q : heat flux of radiant heating panel [W/m²]
- q_r : heat flux because of thermal radiation on active panel surface [W/m²]
- q_c : heat flux from natural convection [W/m²]

58) 2013 ASHRAE Handbook- HVAC systems and Equipment chapter 6.

여기서 복사에 의한 열전달량은 다음의 식 (2.7)을 통해 계산한다.

$$q_r = 5 \times 10^{-8} [(t_p + 273.15)^4 - (AUST + 273.15)^4] \quad (2.7)$$

t_p : effective panel surface temperature [°C]
 $AUST$: area-weighted temperature of all indoor surfaces of walls, ceiling, floor, windows, doors, etc. (excluding active panel surfaces) [°C]

$AUST$ 는 Kilis⁵⁹⁾가 실무 설계 과정에서 사용할 수 있도록 제시한 $AUST$ 를 구하는 간략식인 식 (2.8)을 적용하였다.

$$AUST \approx t_a - d \cdot z \quad (2.8)$$

t_a : indoor space dry-bulb air temperature [°C]
room position index : for example, a room with all indoor exposed sides $d=1$, a room with one outdoor exposed sides $d=2$, a room with two or more outdoor exposed sides $d=3$
 z : $15/25 + t_b$ (outdoor design temperature $t_b \geq -20^\circ\text{C}$)

자연대류에 의한 열전달은 천장 복사 난방의 경우에는 식 (2.9)를 바닥 복사 난방의 경우에는 식 (2.10)을 통해 계산한다.

$$q_c = 0.87(t_p - t_a)^{0.25}(t_p - t_a) \quad (2.9)$$

$$q_c = 2.13|t_p - t_a|^{0.31}(t_p - t_a) \quad (2.10)$$

59) Birol I. Kilis et al., A simplified model for the design of radiant in-slab heating panels, ASHRAE Transactions, 1995.

한편, EN⁶⁰⁾에서는 복사에 의한 열전달과 자연대류에 의한 열전달을 구분하지 않고, 복사 난방 패널의 적용 위치에 따라 천장인 경우에는 식 (2.11), 바닥인 경우에는 식 (2.12)와 같은 수식을 통해 복사 난방 패널의 방열량을 제시하였다. (복사 냉방의 경우, 바닥 난방과 반대로 적용한다.)

$$q_p = 6(t_{rsurf} - t_{room}) \text{ Radiant Ceiling Heating Panel} \quad (2.11)$$

$$q_p = 8.92(t_{rsurf} - t_{room})^{1.1} \text{ Radiant floor Heating Panel} \quad (2.12)$$

- q_p : the heat flow density of radiant heating panel [W/m²]
- t_{rsurf} : the average surface temperature of radiant heating panel [°C]
- t_{room} : the nominal indoor temperature [°C]

이와 같이 AHSRAE와 EN에서 제시된 방열량을 계산하는 수식에 따르면, 복사 난방 패널의 방열량은 복사 난방 패널의 표면온도와 실내 온도의 영향을 받아서 결정된다고 할 수 있다. 그리고 실내 온도는 실의 열평형 및 열쾌적을 위한 설정 온도라 판단할 수 있으므로 패널의 표면온도에 따라 복사 난방 패널의 방열량이 결정된다고 볼 수 있다. 또한 수식에서 제시된 복사 난방 패널의 방열량은 단위면적당 방열량이므로, 복사 난방 패널의 방열면적에 따라 패널의 방열량이 달라질 수 있으며, 이는 곧 패널의 표면온도에 영향을 미친다. 즉, 복사 난방 패널의 표면온도 및 방열면적에 따라 복사 난방 패널의 방열 특성이 달라질 수 있으며, 이는 곧 재실자의 열쾌적에 영향을 미치게 된다. 따라서 다음 절에서는 이와 같은 복사 난방 패널의 방열면

60) BS EN 1264-2 : Water based surface embedded heating and cooling systems. Floor heating: Prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods, 2009

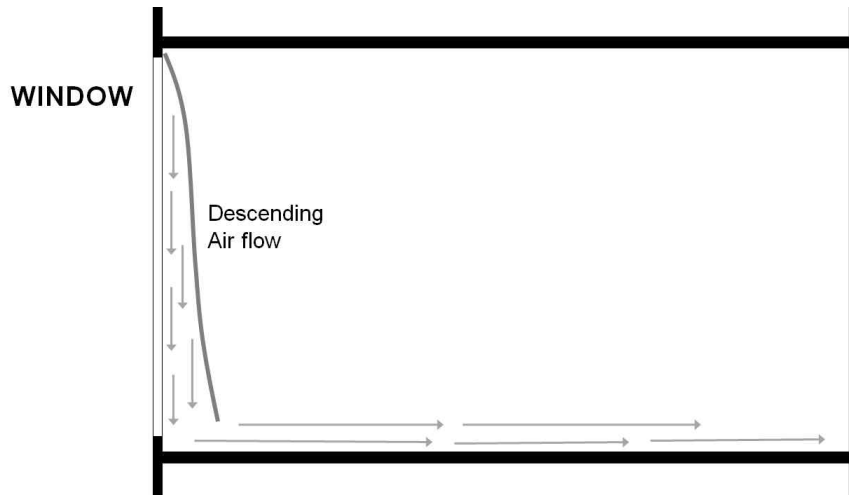
적 및 표면온도에 따른 실내의 열전달 매커니즘을 도출하여 건물 외주부의 열쾌적을 위한 복사 난방 패널의 방열 특성 변화 양상을 분석하였다.

2.2.2 외주부 적용 시의 방열 특성 변화

Peng Shia-hui의 연구⁶¹⁾에 따르면, 천장이나 바닥에서 열을 공급하게 되면 일반적인 수직면에서의 열전달과 다른 양상을 보인다. 따라서 복사 난방 패널과 건물 외주부의 차가운 창문과의 열전달 매커니즘을 분석하여 외주부에서의 열쾌적성 향상을 위해 필요한 물리적인 현상을 도출하고 이때 요구되는 복사 난방 패널의 방열 조건을 제시하고자 한다.

복사 난방 패널이 적용된 공간에서 ‘차가운 창문 표면’에 의해서 발생된 ‘차가운 기류’의 ‘자연대류 하강 흐름’에 의해 발생하는 downdraft를 저감하기 위해서는 천장면이나 바닥면에서 열을 공급하여 차가운 기류의 온도를 상승시켜 주거나 따뜻한 기류의 상승 흐름을 형성해주어 창문주위에 형성된 차가운 공기가 하강하여 바닥면을 타고 재실영역으로 이동하는 흐름을 차단해야 한다. 즉, [Figure 2.14]와 같이 차가운 창문 근처에 형성된 ‘차가운 공기’가 바닥면을 따라 이동할 때, 복사 난방 패널의 방열면에서 자연 대류의 원리로 열을 공급하여 공기의 온도를 서서히 높여 ‘차가운 공기로 인한 불쾌적을 저감’하거나 따뜻한 기류로 인한 상승 흐름을 천장면이나 바닥면에서의 방열을 통해 형성하여 ‘차가운 기류’가 바닥면을 타고 ‘재실 영역으로 유입되는 것’을 차단한다. 그러므로 복사 난방 패널을 통하여 downdraft를 저감하기 위해서는 복사 난방 패널의 표면온도를 높게 하여 창문 근처에 형성된 ‘차가운 기류’에 열을 공급하여 기류의 유입을 차단해야 한다.

61) Shia-hui, Peng et al. Convection from a cold window with simulated floor heating by means of transiently heated flat unit. Energy and Buildings 23, 1995 pp95-103.



[Figure 2.14] Descending airflow by cold window

그러나 이를 위해 복사 난방 패널의 표면온도를 실내 열평형 상태보다 높게 하여 방열할 경우, 실내가 과열되어 채실자의 불쾌감을 유발할 수 있으므로 실내에 요구되는 방열량에 맞추어 복사 난방 패널을 적용해야 하는데, 실내에 요구되는 방열량에 맞추어 복사 난방 패널의 표면온도를 높여주기 위해서는 방열면적을 줄여서 적용해야 한다.

즉, 동일한 방열량 내에서는 방열면적이 좁을수록 표면온도가 높게 형성되며, 방열면적이 넓을수록 표면온도는 낮게 형성된다. Downdraft는 실내 공기의 온도와 기류 속도의 영향에 의해 발생되므로, 복사 난방 패널의 방열면적과 표면온도에 따라 형성되는 실내 공기의 온도 및 기류 속도가 중요하다. 따라서 복사 난방 패널의 방열면적과 표면온도가 실내 공기의 온도 및 기류속도에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 복사 난방 패널은 자연 대류의 원리를 통해 차가운 창문 근처에 형성된 ‘차가운 공기’에 열을 공급한다. 여기서 높은 온도의 유체와 상대적으로 낮은 온도의 유체가 있을 때, 유체는 서로간의 온도차에 의한 밀도차로 인해 속도를 가지고 이동하게

된다. 여기서 유체의 밀도가 속도를 가지고 이동하는 현상은 단위 체적당 운동 에너지로 나타낼 수 있으며 이는 에너지보존법칙에 따라 유체가 가지고 있던 위치에너지가 다른 형태의 에너지로부터 변환된 것이다. 수직 거리가 지남에 따라 경계층에 있는 밀도가 작은 유체와 상대적으로 큰 밀도를 가진 유체 사이의 위치에너지는 식 (2.13)과 같으며, 자연대류에 의해 발생하는 속도는 식 (2.14)과 같다.

$$\rho v^2 \approx g \Delta \rho L \quad (2.13)$$

$$V = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g L} \quad (2.14)$$

- ρ : the fluid density [kg/m³]
- v : the fluid velocity [m/s]
- g : the magnitude of the acceleration due to gravity [m/s²]
- $\Delta \rho$: the characteristic density difference between the boundary layer fluid and that far away [kg/m³]
- L : over a vertical distance [m]

이를 레이놀즈수로 정의하면 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있고 이를 바탕으로 식 (2.16)을 도출할 수 있다.

$$Re_L = \frac{LV}{a} = \sqrt{\frac{\frac{\Delta \rho}{\rho} g L^3}{a^2}} \quad (2.15)$$

$$Re_L^2 = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}gL^3}{a^2} \quad (2.16)$$

Re_L : Reynolds number for the fluid [-]
 a : the kinematic viscosity of the fluid [m²/s]

여기서 식 (2.16)은 자연 대류 현상에서 주로 발생하는 무차원군인 Grashof Number이며, 이는 다음에 나타나는 식 (2.17), (2.18)과 같이 풀 수 있다.

$$Gr = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}gL^3}{a^2} \quad (2.17)$$

$$Gr = \frac{\beta\Delta TgL^3}{a^2} \quad (2.18)$$

Gr : the Grashof number for the fluid [-]
 β : the coefficient of volumetric expansion of a fluid [1/K]
 ΔT : the temperature difference between the surface temperature of the cold wall and the fluid outside the thermal boundary layer [K]

따라서 유체의 속도는 유체간의 온도 차에 비례하여 커지며, 복사 난방 패널이 적용된 경우에는 방열면의 표면온도가 높을수록 방열면 근처에서의 유체와 창문 근처에서의 유체의 온도차가 커서 기류 속도도 높아지게 된다.

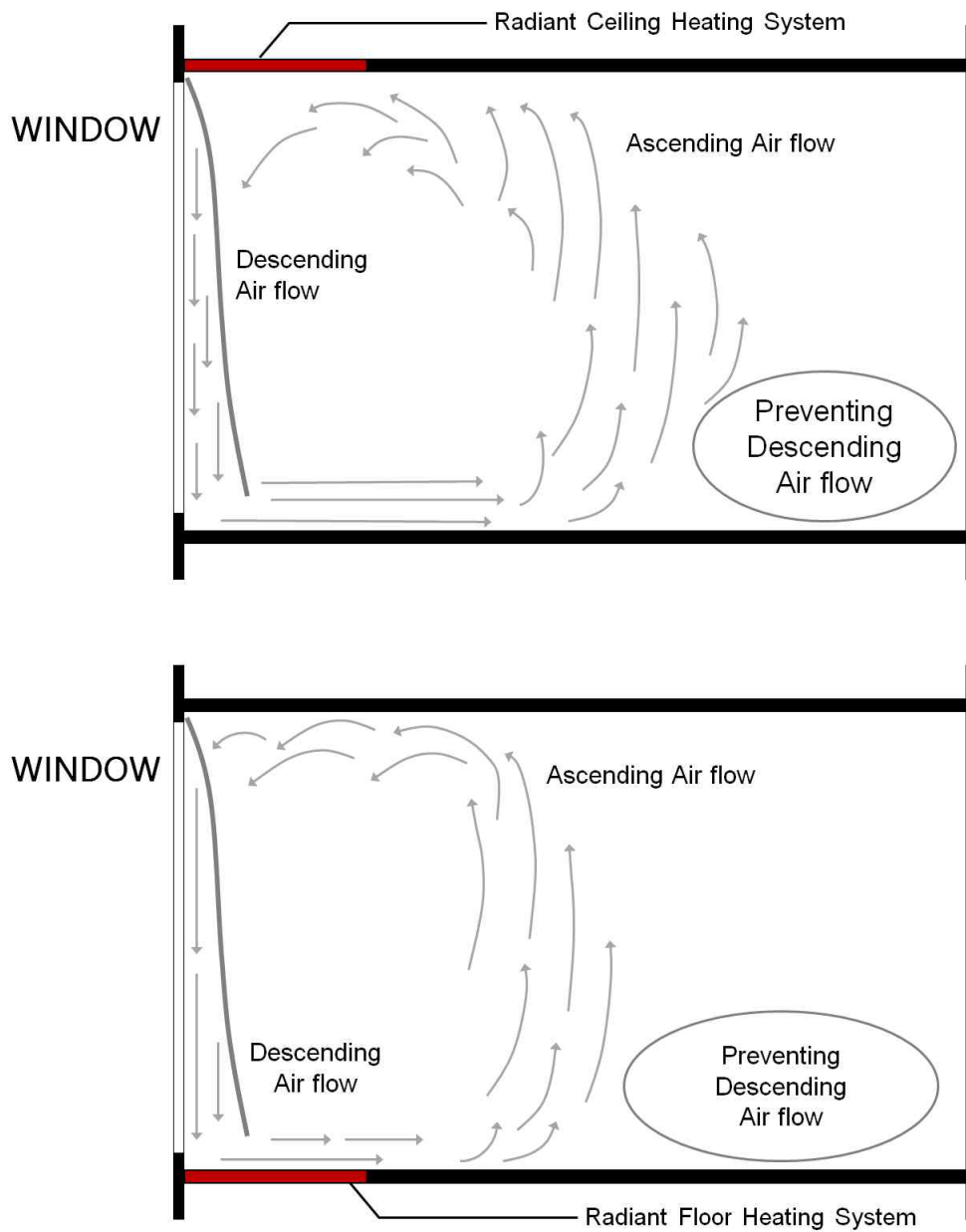
복사 난방 패널이 적용된 공간에 차가운 창문 표면에 의해 형성된 차가운 기류가 하강하여 [Figure 2.13]과 같이 재실영역으로 유입되면, 차가운 기류

에 열을 공급하게 되어 ‘온도가 상승’ 하고, 복사 난방 패널에서 발생된 따뜻한 기류가 상승흐름을 형성하여 ‘차가운 기류의 실내 유입을 차단’한다.

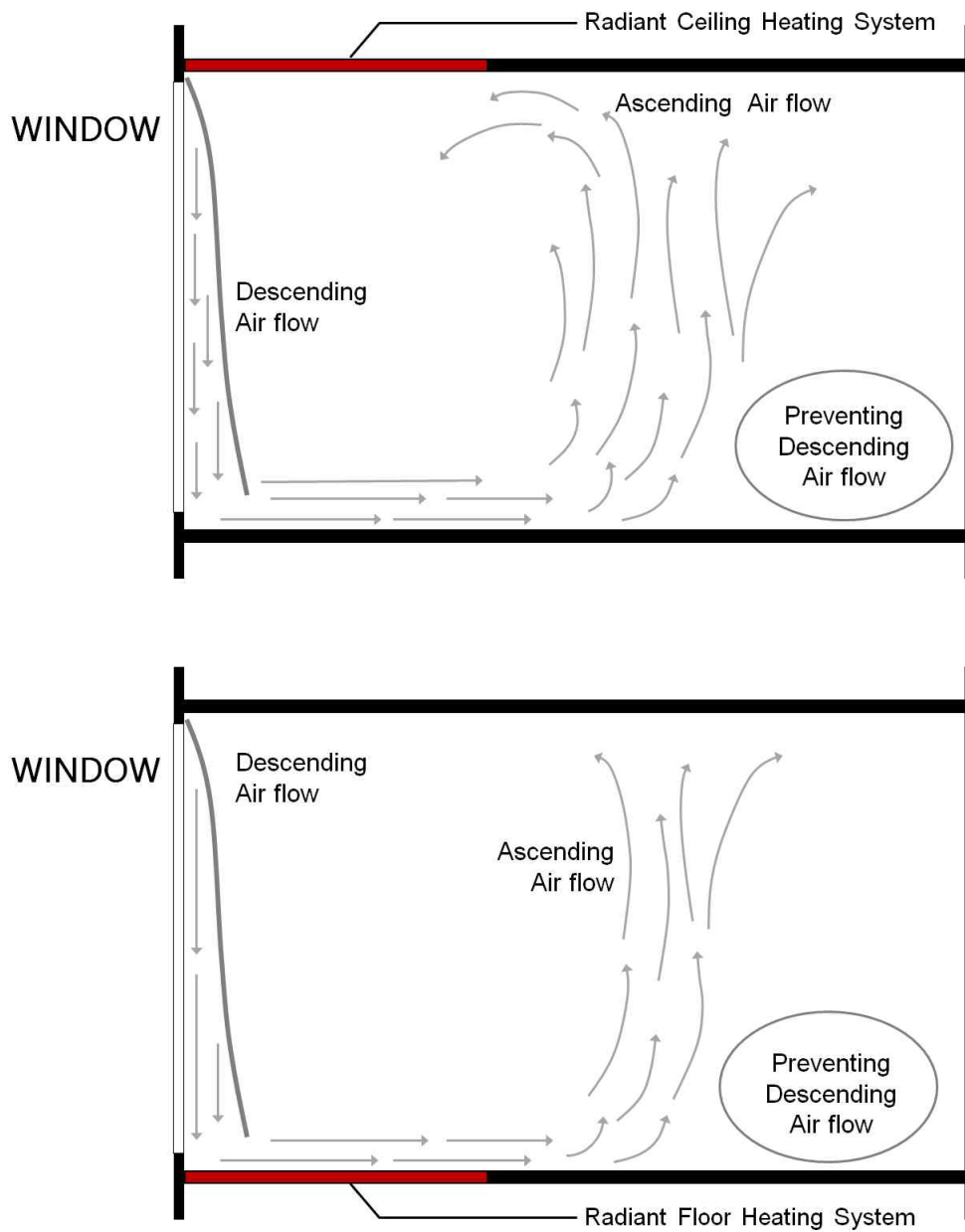
여기서 복사 난방 패널이 [Figure 2.15]와 같이 좁은 면적에 높은 표면온도로 적용될수록 차가운 기류가 실내로 유입되는 것을 차단하여 실내에서 바닥면 부근의 공기 온도가 높게 형성되며, 바닥면을 따라 흐르는 차가운 공기와 복사 난방 패널 표면으로부터 형성되는 따뜻한 공기 사이의 온도차가 커짐에 따라 바닥면의 기류 속도가 상승하게 된다. (천장에 복사 난방 패널이 적용된 경우에는 창문 근처에서 하강하는 기류의 속도도 상승한다.)

반면, [Figure 2.16]과 같이 복사 난방 패널의 방열면적을 넓혀서 실내에 요구되는 방열량에 맞추어 방열을 하는 경우, 방열면의 표면온도가 상대적으로 낮아지게 되므로 바닥면 근처의 공기 온도는 [Figure 2.15]의 경우와 비교하였을 때 상대적으로 낮게 형성이 되겠지만, downdraft를 발생시키지 않기에는 충분한 공기 온도를 형성할 수도 있으며, 따뜻한 바닥면 온도와 차가운 창문면 온도와의 온도차를 줄이기 때문에 바닥면의 기류속도는 저감할 수 있게 된다. Downdraft는 공기의 온도가 낮을수록, 기류의 속도가 높을수록 심화된다. 따라서 복사 난방 패널이 적용된 공간에서 downdraft를 저감하기 위해서는 창문 근처에 복사 난방 패널이 적용되었을 때 적절한 표면온도를 형성하여 창문 측에 형성된 차가운 공기의 온도를 충분히 상승시킬 수 있어야 하며, 차가운 기류에 열을 공급하는 과정에서 높은 온도차로 인한 기류속도의 상승을 유발하지 말아야 한다.

또한 복사 난방 패널의 방열 면적을 좁게 할수록 표면 온도가 높아지게 되는데, 표면 온도가 상승하게 되면 복사불쾌적을 유발할 수 있다. 그러므로 복사 난방 패널의 방열 조건이 downdraft를 발생시키는 않는 조건일지라도 표면온도에 따른 복사불쾌적이 발생하지 않았는지도 검토해야 한다.



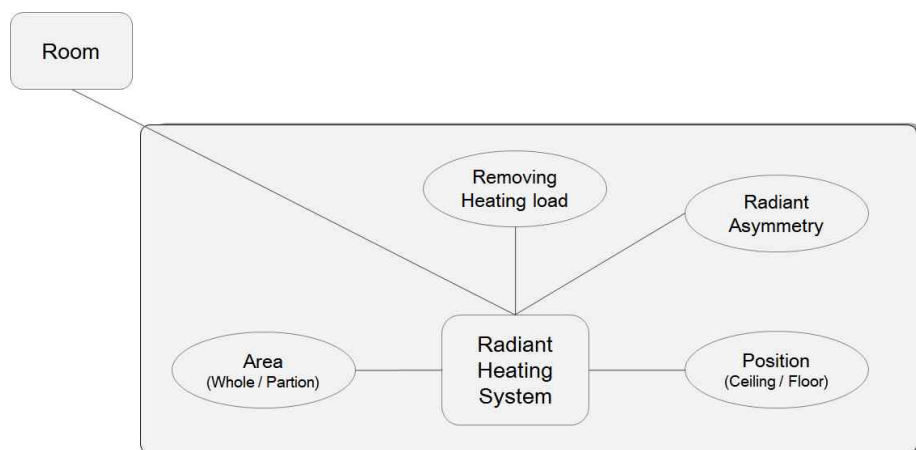
[Figure 2.15] Airflow by application of radiant heating panel
(narrow area / high surface temperature)



[Figure 2.16] Airflow by application of radiant heating panel
(wide area / relatively low surface temperature)

2.2.3 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 설계 요소

복사 난방 패널의 적용은 기본적으로 난방 부하 제거를 위한 열량을 공급하는 상황에서 열쾌적성을 확보할 수 있는 방열 조건을 형성해야 한다. 복사 난방 패널을 건물 외주부에 적용하기 위해 필요한 열량의 공급 및 이에 따른 복사 난방 패널의 방열량 그리고 바닥면 근처에서 기류의 온도 및 속도에 영향을 주는 요소는 앞서 제시된 복사 난방 패널의 표면온도 및 방열면적이라 할 수 있다. 따라서 이와 같은 조건을 복사 난방 패널의 외주부 적용에 따른 열쾌적성에 영향을 미치는 설계요소로 선정하였다. 여기서 복사 난방의 방열면적은 실에서 요구되는 열량과 이에 따른 필요 표면 온도에 따라 결정된다. 또한 복사 난방 패널이 어느 곳에 위치하느냐에 따라 실내 온도 및 기류 분포가 달라지게 되며 이는 곧 재실자의 열쾌적성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 복사 난방 패널의 위치도 중요한 설계 요소라 할 수 있으므로 복사 난방 패널의 위치에 따른 열쾌적성 평가도 수행하도록 한다. 이와 같은 복사 난방 패널의 설계 요소를 정리하면 [Figure 2.17]과 같다.



[Figure 2.17] Parameters of radiant heating panel

2.3 기존 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가

복사 난방 패널이 적용된 건물 외주부에서의 열쾌적성 평가는 Heat - balance approach의 방법으로 테스트셀 내에서 실내 온열 환경을 측정하거나 사람을 통한 조사를 하는 방법 있으며, 또는 adaptive approach의 방법으로 실제 건물에서의 쾌적성을 TSV를 통한 재실자의 설문조사를 수행할 수 있다. 이와 같은 방법은 열쾌적성을 평가하기 위한 실험 방법이라고 할 수 있으며, 평가하고자 하는 조건이 다양하거나, 실내외 조건을 실제로 구현하기 어려운 경우에는 열쾌적성 평가를 위해 필요한 요소를 구현하여 시뮬레이션을 수행하는 방법도 있다.⁶²⁾ 본 절에서는 이와 같이 열쾌적성을 평가할 수 있는 두 가지 방법에 대한 연구들을 고찰하고 기존 연구의 한계 및 본 연구에서의 해결 방안을 제시하였다.

2.3.1 실험을 통한 열쾌적성 평가

Olesen⁶³⁾은 downdraft 평가를 위한 최대 기류속도를 계산하였는데, 공간에서의 창문 높이와 창문의 U-value를 조합한 수식을 도출하여 허용 가능한 최대 기류속도의 범위를 제시하였다. 그러나 공기의 온도에 대해서는 고려하지 않아, ‘차가운 기류’에 대한 부분이 반영되지 못하였다. Heiselberg⁶⁴⁾는 창문을 사이에 두고 양편에 실외 공간과 실내 공간이 구현된 단열 공간에서의 실험을 통해 창문의 표면온도에 따라 형성되는 하강 기류의 최대 기

62) Caroline Karmann et al. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems - A critical literature review, Building and Environment 111, 2017, pp123-131.

63) B.W. Olesen, W. Vereinfachte methode zur vorausberechnung des thermischen raumklimas. Heiz. Luftung Klima Haustech 46, 1995, pp219 - 225.

64) Per Heiselberg, Draught risk from cold vertical surfaces, Building and Environment 29, 1994, pp297-301.

류 속도 분포를 분석하여 downdraft의 발생 정도를 평가하였다. 또한 기류의 흐름을 가시화하여 차가운 기류의 경계층 흐름을 파악하였다. 그리고 Manz⁶⁵⁾는 Heiselberg의 연구를 토대로 실내에 발열되는 요소가 있을 경우에 대한 downdraft 평가를 수행하였는데 발열체에서 발생하는 따뜻한 기류가 상승하여 천장면을 타고 창문 측으로 이동하다가 하강하면서 기류속도를 증가시킨다는 연구 결과를 도출하여 가중계수1.5를 Heiselberg의 수식에 적용하여 실내 발열체가 있는 경우의 최대 기류속도를 도출하였다.

Hua⁶⁶⁾는 실험을 통해 환기 시스템을 창문에서 멀리 떨어진 방의 구석에 위치시켰을 경우의 downdraft 발생을 분석하기 위해 벽체로부터의 거리에 따른 공기 온도 및 기류 속도, DR의 분포에 대한 평가를 수행하였으며, Larsson의 연구⁶⁷⁾에서는 한쪽 벽의 상층부에 창문이 적용된 실험공간에서 창문의 단열성, 창턱의 높이 등에 따른 하강 기류의 흐름을 분석하였다.

건물 외주부에서의 열쾌적성을 평가한 실험 연구들의 경우, 다양한 조건에서의 downdraft의 발생 정도를 판단하지 못하였으며 대부분 공간이 단열된 조건에서 실험을 수행하였기 때문에 downdraft에 영향을 미치는 외부환경조건을 반영하지 못하였다. 또한 내부발열 (실내의 조명, 기기 등으로 인한 기기 발열과 재실자로 인한 인체 발열 모두를 포함)에 대한 영향을 평가함에 있어서도 내부발열을 실내에서 발생할 수 있는 하나의 발열체로 고려하고 제거해야하는 냉방부하로는 판단하지 않았기 때문에, 내부발열 평가시에 실내가 열평형 상태에 있는지, 즉 실에서 발생된 난방 부하와 냉방 부하를 어떻게 처리하는지에 대해 고찰하지 않았다. 그리고 이로 인하여 실험

65) H. Manz et al. Op. cit., pp 233-242

66) Hua Ge et al. Experimental investigation of cold draft induced by two different types of glazing panels in metal curtain walls, Building and Environment 39, 2004, pp115-125.

67) U. Larsson et al. Experimental investigation of downdraught from well insulated windows, Building and Environment 37, 2002, pp1073-1082.

시 실내가 과냉 또는 과열이 되어 재실자의 쾌적성에 영향을 지칠 수 있으나, 이러한 부분에 대해 제시된 논문의 데이터만으로는 판단할 수가 없었다.

2.3.2 시뮬레이션을 통한 열쾌적 평가

시뮬레이션을 이용하여 건물에서의 열쾌적성을 평가하는 경우, 대부분 CFD 시뮬레이션을 활용하여 평가한다. CFD 시뮬레이션을 통해 downdraft의 평가를 수행한 Schellen⁶⁸⁾은 창문의 높이 및 표면온도 등에 따른 기류 속도와 DR을 분석하였으며, Jurelionis⁶⁹⁾는 CFD 시뮬레이션을 통해 실내에서의 PPD 분포를 나타내어 downdraft 발생을 분석하였는데, 이 연구에서는 창문의 단열성에 따라 나타나는 최대 기류 속도를 Heiselberg, Manz의 수식과 비교 평가하여 신뢰성을 확보하였다. 또한 downdraft로 인한 불쾌감이 발생하지 않도록 하는 외피의 한계높이를 제시하였다.

한편 Myhren⁷⁰⁾은 냉각된 공기의 가열을 통한 downdraft의 저감 정도를 평가하기 위해 다양한 Heating Method에 따른 실내 기류 속도 분포를 분석하였다. Mustakallio의 연구⁷¹⁾에서는, 난방을 위한 CBRP (chilled beam having an integrated radiant panel)가 적용된 사무소 건물에서의 온열환경을 분석하였다. 그 결과, 창문의 표면 온도가 14~15℃ 일 때 복사 난방 패널을 적용한 경우 실내 수직 온도 분포 및 복사 온도가 본 연구에서 제시된

68) L. Schellen et al. Downdraught assessment during design : experimental and numerical evaluation of a rule of thumb, Building and Environment 57, 2012, pp290-301.

69) Andrius Jurelionis et al. CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces, Journal of Civil Engineering and Management 14, 2008, pp29-38.

70) Jonn Are Myhren et al. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating, Energy and Buildings 40, 2008, pp524-536.

71) Panu Mustakallio et al. Full-scale test and CFD-simulation of radiant panel integrated with exposed chilled beam in heating mode, Building Simulation 10, 2017, pp75-85.

기준범위를 만족시켰으며, 이러한 과정을 통해 복사 난방 패널은 추운 기후 (cold climate) 조건에서 재실자의 열쾌적성을 향상시킬 수 있는 유용한 시스템임을 증명하였다. 또한 Maxime Tye-Gingras⁷²⁾는 CFD를 실내 기류 해석 및 온도 분포를 통한 온열환경 분석 뿐만이 아니라 복사 시스템이 적용된 공간에서 복사 시스템 설치 유형에 따라 건물 구조체와 연계하여 열전달 해석 및 열쾌적성 평가가 가능함을 제시하였다. 이를 위하여 천장 복사 패널의 배관을 모델링하여 배관을 따라 흐르는 열의 흐름 반영하였으며, 천장 복사 패널의 경계조건으로 온도나 열량을 줄 경우에, 천장 복사 패널의 경계 조건값이 고정되어 창문 또는 주변 벽체와의 복사열교환 효과와 천장 복사 패널의 표면 및 주변 공기층과의 대류열전달 효과를 반영할 수 없는 문제를 해결하였다. 그러나 외기온에 따른 창문의 온도 구배 현상에 대해서는 고려하지 않았다. 그리고 Tiberiu Catalina⁷³⁾는 복사 패널 시스템이 설치된 공간에서의 수직 온도 분포, 패널의 표면 온도, 쾌적성 (PMV and PPD)을 실험과 시뮬레이션 (CFD)를 이용하여 산정하였는데, 실험의 결과값을 CFD의 경계 조건으로 이용하여 열쾌적성을 평가하였으며, CFD 평가 시에 실험을 통한 검증 및 경계 조건값을 설정하는 것이 해석의 정확성을 높일 수 있는 방법임을 증명하였다.

이와 같은 CFD 연구들은 쾌적성 평가에 필요한 시스템의 적용은 정밀하게 해석하였으나 창문의 표면온도를 고정된 조건으로 판단하여 하강기류로 인한 창문 표면의 온도 편차 및 복사열교환으로 인한 창문의 온도상승효과를 고려하지 못하였다.

72) Maxime Tye-Gingras et al, Comfort and energy consumption of hydronic heating radiant ceilings and walls based on CFD analysis, Building and Environment 54, 2012, pp1-13.

73) Tiberiu Catalina et al, Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling, Building and Environment 44, 2009, pp1740-1750.

2.3.3 기존 연구의 한계 및 개선 방안

건물 외주부에서의 열쾌적성 평가에 관한 기존 연구를 본 연구에서 주제로 설정한 문제에 따라 <Table 2.7> 과 평가하여 기존 연구의 한계 및 본 연구를 통한 해결 방안을 제시하였다.

① 건물 환경 조건이 열쾌적성 평가에 적합하게 구현되었는가?

창문을 고정된 조건으로 설정하면, 두면 사이의 열교환 및 창문의 온도구배를 반영하지 못한다. 또한 기류의 흐름을 단일한 환경 조건으로 모사하여 요소들이 동시에 적용되었을 경우에 달라지게되는 기류의 혼합 양상을 도출할 수 없어 실제 상황에서의 열쾌적성과 차이가 난다.

② 복사난방시스템이 필요조건에 맞게 건물에 적용되었는가?

복사난방시스템의 방열량이 부하를 제거하기 위한 방열량이 아닌 임의의 방열량으로 설정하여 실제 적용과 거리가 있으며, 복사난방시스템의 적용을 통해 해결해야할 문제와 방법이 고려되지 않았다. 또한 복사불균등 등 복사난방시스템 적용 시 고려해야할 요소들을 분석하지 않았다.

③ 재실자의 쾌적성을 적절한 판단기준에 따라 옳게 평가하였는가?

재실자의 쾌적성 평가 시, 이에 긍정적인 영향을 주는 요소나 부정적인 영향을 주는 요소에 대해 구분하여 평가해야한다. 또한 국부적 불쾌감의 평가 시에는 PMV 지표를 병행하여 비교 평가를 수행해야 하며, 차가운 기류의 흐름을 평가 할 때 Draft rate 값이 실제로 차가운 기류의 영향으로 인한 불쾌적인지에 대해서도 검토해야 한다.

〈Table 2.7〉 Comparative of previous study and this study

Classification	Parameters of indoor environment				Radiant heating panel			Method of thermal comfort assessment		
	window temp. Profile	Positive	Negative	Neutral	remove heating load	thermal output	radiant asymmetry	local dis-comfort	over-rall comfort	Trade-off
B. W. Olesen			○			○		○	○	
Per Helselberg	○					○		○		
H. Manz	○			○		○		○		
Peng Shia-hui	○					○				
Jonn Are Myhren			○			○			○	
L. Schellen						○			○	
Panu Mustakallio						○		○	○	
Maxime T. Gingras					○	○	○		○	
This Study	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

이에 본 연구에서는 외부환경조건과의 차이로 인한 실내의 열환경 변화와 실내 환경 요소의 영향, 그리고 복사 난방 시스템의 적용성을 고려하여 건물 외주부에서의 열쾌적성을 평가하고자 한다. 또한 기존 연구결과를 개선하기 위하여 복사 난방의 복사열로 창문이 가열되는 효과와 외기의 영향으로 인한 창문의 온도 구배에 따른 온도 profile을 해석하고자 한다. 그리고 건물 환경 조건 및 이에 따른 자연대류효과도 고려하고자 하며, 이에 대한 내용은 다음 3장에서 제시하였다.

2.4 소결

본 장에서는 건물 외주부의 열쾌적성 향상을 위한 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하는 연구의 예비적 고찰 단계로서 건물의 실내외 온도차에 따른 외주부에서의 물리적인 현상 및 이에 따른 외주부의 열적 특성에 대해서 고찰하여 외주부에서의 열쾌적성을 확보할 수 있는 물리적인 방법을 제시하였다. 그리고 이와 같이 상황에서 열쾌적성을 평가할 수 있는 방법에 대해서 국외 기준 및 선행 연구를 근거로 분석하였으며, 복사 난방 패널의 열쾌적성에 영향을 미치는 건물의 실내외 환경 요소를 도출하였다. 또한 복사 난방 패널이 외주부에 적용되었을 경우에 쾌적성을 확보할 수 있는 방열 특성을 분석하여 열쾌적성 관점에서 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성을 파악하였으며, 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하기 위한 방법에 대하여 선행 연구의 사례 및 이에 대한 한계점과 본 연구에서의 개선 방안에 대하여 서술하였다.

- 1) 외주부 시스템은 외부와 외피표면과의 열전도를 차단하고 외피표면으로부터의 복사열교환과 확산에 의한 열전달을 억제해주거나, 창문에 인접한 부근의 공기온도를 실내 온도와 유사하게 유지할 수 있도록 열을 공급해주어 이류에 의한 열전달을 억제해주어야 한다. 이를 위해 현재까지는 FCU나 Convactor, Perimeter-less 시스템과 같은 강제대류 시스템이 주로 사용되어 왔지만, 자연대류를 통한 열교환과 더불어 복사 열교환을 통하여 열을 공급하는 복사 난방 패널도 외주부에서의 열전달 현상과 이에 대한 물리적인 해결 방안을 분석하였을 때, 개념적으로는 열쾌적성 확보를 위해 적용 가능한 대안이 될 수 있다. 따라서 복사

난방 패널이 열쾌적성 관점에서 외주부에 적용 가능할지에 대한 평가가 필요하며, 이는 차가운 창문과 채실자 사이의 대류 열교환으로 인한 쾌적성 즉, downdraft와 차가운 창문과 채실자 그리고 복사 난방 패널 사이의 복사 열교환으로 인한 복사불쾌적을 바탕으로 평가할 수 있다. 또한 본 연구에서는 downdraft 평가 시 decay ratio of downdraft라는 개념을 제시하여, downdraft의 발생 특성에 따른 채실자의 쾌적성을 평가할 수 있도록 하였다.

- 2) 복사 난방 패널의 외주부 적용에 따른 열쾌적성을 평가하는 경우에는, 건물의 다양한 환경 요소를 도출하고 열쾌적성에 긍정적인 요소와 부정적인 요소를 구분하여야 한다. 건물 외주부의 열쾌적성에 긍정적으로 작용하는 요소로 건물 난방부하 계산 시 부하값에 (-)로 작용하는 요소인 Solar heat gain과 Internal heat gain을 도출하였으며, shieling은 건물의 인테리어적인 요소로서 건물에 항상 적용되는 시스템이 아니지만, 열쾌적성 향상에 영향을 줄 수 있으므로 긍정적으로 작용하는 요소로 판단하였다. 그리고 부정적으로 작용하는 요소는 건물 난방부하 계산 시 (+)로 작용하는 요소라 할 수 있으며, 여기에는 infiltration을 도출하였다. Internal heat gain은 난방부하를 저감시키고, 따뜻한 기류의 흐름 및 복사열교환 효과 등으로 인해 쾌적성을 향상시킬 수 있지만, 내부발열로 인해 발생된 따뜻한 기류가 천장면으로 상승하여 천장면을 타고 창문 근처로 유입될 경우에는 창문 근처에서 하강하는 기류를 증폭시켜 downdraft의 발생을 심화시켜 외주부에서의 열쾌적성에 부정적으로 작용할 수도 있으므로 neutral 요소로 판단하였다.

- 3) 복사 난방 패널 적용 시에는, 외주부에서 발생할 수 있는 downdraft와 같은 기존 불쾌적 문제를 해결하면서 동시에 복사불쾌적과 같이 복사 난방 패널의 적용으로 인한 불쾌적의 문제도 나타나지 않아야 한다. Downdraft는 공기의 온도가 낮을수록, 기류의 속도가 높을수록 심화되는데 복사 난방 패널이 downdraft 저감을 위해 창문 근처에 적용되었을 때에는 적절한 표면온도를 형성하여 차가운 기류의 온도를 충분히 상승시킬 수 있어야 하며, 차가운 기류에 열을 공급하는 과정에서 온도차로 인한 기류속도의 상승을 유발하지 말아야 한다. 또한 복사 난방 패널의 방열면적을 좁게 할수록 표면 온도가 높아지게 되는데, 표면 온도의 상승은 기류속도의 상승뿐만 아니라 복사불쾌적을 유발할 수도 있다. 그러므로 복사 난방 패널의 방열 조건이 downdraft를 발생시키지 않더라도 표면온도에 따른 복사불쾌적을 발생시키지는 않는지 검토해야 한다. 이를 위해 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하는 경우, 패널의 설계 요소로 패널의 위치, 방열면적 그리고 표면 온도를 도출하였다.
- 4) 복사 난방 패널이 적용된 건물에서의 열쾌적성 평가 시에는 외부환경조건과의 차이로 인한 실내의 열환경 변화와 실내 환경 요소의 영향, 그리고 복사 난방 시스템의 적용성을 고려하여 수행해야 한다. 따라서 복사 난방의 복사열로 창문이 가열되는 효과와 외기의 영향으로 인한 창문의 온도 구배에 따른 온도 profile을 해석할 수 있어야 하며, 침기나 내부발열과 같은 건물의 실내외 환경 조건 및 복사 난방 패널의 자연대류를 통한 방열 현상을 구현할 수 있어야 한다.

제 3 장 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 모델 구축

3.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소 모델링

3.2 시뮬레이션 모델 구축

3.3 소결

건물의 실내외 환경에 영향을 받는 난방 부하와 그에 따른 복사 난방 패널의 적용 방법 및 방열량은 실내의 온도 분포 및 기류 흐름에 영향을 줄 수 있으며, 이는 곧 재실자의 쾌적성에 직결되는 문제가 된다. 특히, 복사 난방 패널은 자연대류의 원리로 열을 공급하기 때문에 실내에서의 기류 흐름이나 온도 변화 등에 영향을 받게 되며, 이에 따라 복사 난방 패널의 열쾌적성 향상을 위한 방열 조건이 달라질 수 있다. 따라서 복사 난방 패널의 적용을 통한 건물 외주부의 열쾌적성을 평가하기 위해서는 복사 난방 패널의 열쾌적성에 영향을 미치는 다양한 건물의 환경 요소를 반영하여 각 환경 요소들의 열쾌적성 영향도에 따른 시뮬레이션 모델을 개발하여야 한다.

이에 본 장에서는 앞서 도출된 열쾌적성에 영향을 미치는 건물의 실내외 환경 요소 및 복사 난방 패널 설계 요소의 모델링 방법을 분석하고 각 요소별 영향도를 분석하였다. 그리고 복사 난방 패널의 외주부 적용 시의 열쾌적성 평가를 수행할 수 있도록 대상 공간과 복사 난방 패널을 형상화하고 건물의 실내외 환경 조건을 모델링한 후에 적합한 계산 모델을 선정하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 구축한 모델은 기존의 실험 결과를 통하여 검증하였다.

3.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소 모델링

복사 난방 패널이 적용된 건물 외주부에서의 열쾌적성 평가 시, 창문 측의 차가운 기류와 복사 난방 패널의 방열을 통한 따뜻한 기류의 혼합에 영향을 주는 모든 요소에 대한 평가 필요하다. 즉, 복사 난방 패널이 적용될 경우에는 차가운 외부의 영향뿐만 아니라 건물 실내의 다양한 환경 요소에도 영향을 받으므로 이러한 요소를 고려하여 열쾌적성을 평가해야 한다. 이와 같이 건물 실내에서의 다양한 환경 조건과 외부 조건을 반영해서 평가해야 하므로 시뮬레이션의 신뢰성이 확보된다면 시뮬레이션으로 평가 모델을 구현하여 분석하는 것이 결과의 정확성이나 효율성 측면에서 유리하다고 판단된다. 따라서 복사 난방 패널의 외주부 적용에 따른 열쾌적성 평가는 복사 난방의 설계 조건과 건물의 다양한 실외내 조건을 반영하여 열쾌적성을 평가할 수 있는 CFD 시뮬레이션을 통하여 수행하고자 한다.

이를 위해서 시뮬레이션 평가 대상 공간을 선정하고 앞서 도출된 건물 실내외 환경 요소 및 복사 난방 패널의 설계 요소의 적용을 위해서 국외 기준 및 선행 연구를 근거로 시뮬레이션에서의 건물 환경 요소 및 복사 난방 패널의 모델링 방법을 분석하였으며, 이를 바탕으로 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션 모델을 제시하였다.

3.1.1 시뮬레이션 평가 대상 공간

시뮬레이션에서의 대상 공간은 Open Space의 단위 모델로서 표준적이라 할 수 있는 길이와 사이즈를 선정해야 할 필요가 있다. 그리하여 대상 공간에 대한 시뮬레이션 수행 시에 건물 외주부의 열쾌적성을 향상시킬 수 있는

방안 및 해결책이 제시되고 이것이 일반적으로 적용 가능한 데이터로서의 가치를 지닐 수 있도록 대상 공간 모델링의 설정 값들이 근거 있게 제시되어야 한다. 따라서 대상 공간의 모델링에서 가장 표준적이라 할 수 있는 값이 적용될 수 있도록 평가 대상 공간은 건물의 내외주부 구분이 뚜렷하고 이에 따른 시스템이 적용되는 오피스 빌딩을 대상으로 하였다.

오피스건물의 평면 형태는 기둥의 배치에 의한 영향이 매우 크다⁷⁴⁾고 할 수 있으며, 정보통신계통의 수평배선이나 레이아웃의 변경, 업무공간의 확장/축소 나 분할/통합, 개방성 등에 효과적으로 대응하기 위해서는 사무실내에 기둥이 배치되지 않는 것이 효율적이다. 그러나 오피스건물의 경우, 건물의 규모 및 용도, 재실인원 등과 같은 다양한 요인에 의해 평면계획이 결정되므로 주거건물과 같이 고정화된 평면의 적용에 어려움이 있다.

이에 따라 오피스 빌딩 공간 계획에 있어서 몇 가지 Principle을 선정하고, 시뮬레이션 대상 공간의 범위를 설정하였다. 그리고 설정된 범위를 오피스 빌딩 공간의 표준에 가까운 값이라 가정하고, 설정된 범위에 속하는 실제 오피스 빌딩의 공간을 Prototype으로 선정하여 시뮬레이션 수행하였다.

(1) 오피스 빌딩 공간의 prototype 선정을 위한 principle

오피스 빌딩 공간의 Prototype 선정을 위한 Principle은 오피스 빌딩의 건축계획원리 및 오피스 빌딩의 공간적 특성에 대해 연구한 기존 연구 결과 그리고 열쾌적성 평가를 위해 고려해야할 실내외의 환경 요소를 참조하여 <Table 3.1>과 같이 선정하였다.

74) 김상호, 고층 인텔리전트 사무소건물의 평면계획 특성, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 2003, pp355-358.

〈Table 3.1〉 Prototype of simulation space model

Classification	Description
실내 단위 모듈	<ul style="list-style-type: none"> 실내 공간의 효율적 사용을 위해 단위 모듈에 기둥은 최소한으로 배치하는 것이 유리하므로, Prototype 선정 시에 이를 반영하도록 한다.
천장고	<ul style="list-style-type: none"> 천장고는 재실자의 심리적 반응을 고려하여 2.5m 이상으로 계획하는 것이 유리하다.
재실밀도	<ul style="list-style-type: none"> 재실밀도는 사무공간의 일반적인 기준인 $0.1\text{인}/\text{m}^2 \sim 0.2\text{인}/\text{m}^2$ 범위에 들도록 하는 것이 좋다.
외주부/내주부 구분	<ul style="list-style-type: none"> 열쾌적성 평가를 위하여 Perimeter Zone과 Interior Zone이 구별되며, 외주부시스템이 설치된 공간을 Prototype으로 선정하도록 한다.

(2) Prototype 공간 범위의 설정

앞서 선정된 Principle에 따라 오피스 빌딩 공간의 표준에 가깝다고 가정
한 공간의 범위를 아래와 같이 도출하였다.

(가) 실내 단위 모듈

실내공간에서의 기둥 배치는 건물 설계 시의 구조 모듈 계획과 관련이 있는
요소라 할 수 있다. 또한 오피스 빌딩에서의 구조모듈은 지하부분의 주
차모듈과 직접적인 관계가 있으며, 주차장의 규모가 큰 고층 오피스 빌딩일
수록 가장 경제적이고 효율적인 구조계획을 위해서는 주차모듈을 우선적으
로 고려하여 구조모듈을 결정하는 경우가 많다.

현재 많은 건물에서 7.8m을 적용하고 있으며, 이는 3대의 주차를 수용할
수 있는 단위이다. 최근에는 건물의 대형화, 초고층화 및 구조/시공 기술의
발달로 장스팬화가 시도되고 있는데 주차 모듈을 장스팬으로 하는 경우에는
4대 주차를 기본 단위로 하여 10.5m의 모듈의 사용하는 경우도 많다.⁷⁵⁾

75) 이선우, 사무공간의 통합모듈 시스템 구축을 위한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 2004

국내외 오피스 빌딩의 구조모듈을 조사한 연구에 따르면,⁷⁶⁾ 각 건물별 구조모듈은 3m에서 18m까지 다양하게 나타나고 있으며, 국내 오피스 빌딩의 경우 9m × 12m 내외의 구조모듈이 적용된 건물의 비율이 가장 높게 나타났다. 구조 모듈의 경우, 표준값을 도출하는 것에는 무리가 있지만 일반적으로 9m × 12m 내외의 구조모듈이 표준과 가장 유사한 구조 모듈이라 할 수 있으며, 따라서 오피스 빌딩 평면의 Prototype 선정 시에 9m × 12m 내외의 구조모듈을 본 연구에서는 가장 표준에 가까운 단위모듈이라 가정하였으며, 이에 따라 기둥의 배치를 최소화하기 위해서 Prototype 은 단위 모듈 범위 내에 있는 공간을 선정하고자 하였다.

(나) 천장고

천장고의 경우, 재실자가 공간 내에서 불편함을 느끼지 않으려면 최소 2.5m의 높이는 확보되는 것이 좋다. 또한 천장고의 추세를 살펴보면, 층고와 비교하여 증가량은 작지만 2.6m에서 최근 2.7m 전후로 증가하고 있는 추세이다.⁷⁷⁾ 그리고 최근 5년간 준공된 사무소건물의 설계현황을 조사한 자료에 따르면,⁷⁸⁾ 2.7m의 천장고를 갖고 있는 사무소 건물이 가장 많은 것으로 나타났다. 따라서 천장고의 범위는 2.7m 내외로 적용하는 것이 일반적으로 통용될 수 있는 천장고의 높이라 할 수 있을 것으로 판단된다.

(다) 재실밀도

1990년대 초의 일반적인 사무공간의 재실밀도는 0.2인/m²이었으나, 90년대

76) 조가영, 사무공간의 환경성능을 고려한 워크스테이션유니트 구축에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 2006

77) 이선우, Op. Cit

78) 미래부, 건물 에너지 효율 향상을 위한 SMART Energy Balancing 기법 연구 4차년도 보고서, 2014

중반 국내 경제의 성장 및 사무공간의 쾌적성에 대한 관심 증대로 인해 0.1인/m²으로 저밀화 되었다고 한다.⁷⁹⁾ 그러나 IMF로 인한 국내 경기 악화 및 부동산 가격의 상승과 사무소 건물의 고급화로 인한 임대료 상승은 사무공간의 재실밀도를 다시 높이게 되는 결과를 낳게 되어 최근 준공된 건물의 재실밀도는 0.2인/m²을 보이는 경우를 많이 볼 수 있다.

건물의 재실밀도는 실의 용도 및 워크스테이션, 업무 유형에 따른 1인당 필요면적 등에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 국내외 기준에서의 권장기준인 0.1인/m² ~ 0.2인/m²의 범위를 표준에 가까운 값으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다.

(라) 외주부/내주부 구분

건물 외주부에서의 열적 특성으로 인해 downdraft와 같은 현상이 발생하게 되고 이는 재실자의 불쾌적을 유발할 수 있는데 이를 저감하기 위해서 일반적으로 건물 외주부 즉, Perimeter Zone에 보조난방장치를 설치하게 된다. 따라서 Downdraft가 발생할 수 있는 일반적인 오피스 빌딩에서의 시스템 적용 사항을 반영하기 위하여 Perimeter Zone에 보조 난방 장치가 적용된 공간을 Prototype으로 선정하는 것이 좋다. 이와 같은 공간은 내외주부를 명확히 구획하여 각각의 부하 특성에 따라 시스템을 적용한다. 일반적으로 외주부에 적용된 시스템은 난방부하를 담당하고, 내주부에 적용된 시스템은 냉방부하를 담당하기 때문에, 향후 복사 난방 패널 뿐만이 아니라 복사 냉방 패널의 적용성을 분석하는데도 참고할 수 있다.

이와 같은 결과를 바탕으로 Prototype의 공간범위를 정리하면, <Table 3.2>와 같다.

79) 이한석 외, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 1991, pp173-178.

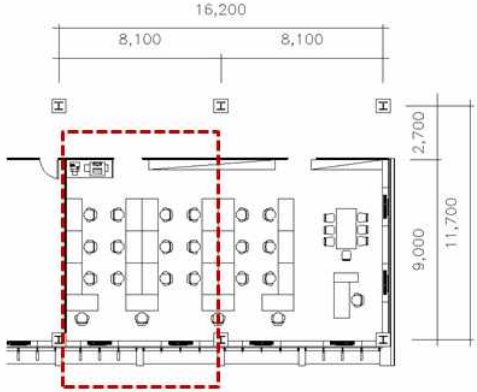
〈Table 3.2〉 Space range of prototype

Classification	Description
Ceiling height	2.7m ~ 3.0m
Depth of space	Maximum 9m
Unit model (structure module by column)	9m × 12m
Occupation density	0.1person/m ² ~ 0.2person/m ²

(3) Prototype 공간 범위의 설정

앞서 선정된 표준 대상 공간의 범위를 바탕으로 설정된 범위 내의 공간을 조사하여 〈Table 3.3〉과 같은 오피스 빌딩의 평면을 Prototype으로 선정하였다.

〈Table 3.3〉 Prototype of simulation space model

Classification	Description
Depth of space	9m
Unit model	8.1m × 9m
Ceiling height	3.0m
Occupation density	0.2인/m ²
Floor plan	

이와 같이 선정된 prototype은 평면 유형뿐만이 아니라, 인체, 조명, 기기와 같은 내부 발열 요소와 책상 등과 같은 비발열 요소의 도출에 참고가 될 수 있으며, 향후 복사 난방 패널의 적용을 위한 부하 계산, 내외주부 면적 산정 등에 활용될 수 있다.

3.1.2 건물의 실내외 환경 요소 모델링 방법

시뮬레이션 모델은 분석하고자 하는 요소를 어떻게 모델링하느냐에 따라 결과가 달라질 수 있다.⁸⁰⁾⁸¹⁾ 즉, 평가하고자 하는 대상과 이를 위한 이론적 가정에 적합하도록 시뮬레이션 모델을 개발하지 않으면, 연구에서 필요로 하는 결과를 도출하지 못하게 된다.⁸²⁾ 따라서 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션 모델을 개발하기에 앞서 도출된 건물 환경 요소를 어떻게 모델링할지에 대한 분석이 필요하다.

이에 본 절에서는 이와 같이 재실자의 열쾌적성에 영향을 미치는 건물의 실내외환경요소들에 대한 모델링 방법을 국내외 선행 연구를 조사하고, 각 요소들의 열쾌적성에 대한 영향도를 검토하여 본 시뮬레이션에 적합한 모델링 방법을 제시하였다.

(1) 내부발열 모델링 방법

Partition, Shielding 과 같은 비발열체를 포함한 내부발열은 주로 오피스 건물을 대상으로 분석한 연구에서 확인할 수 있으며, 인체, 천장 조명과 함

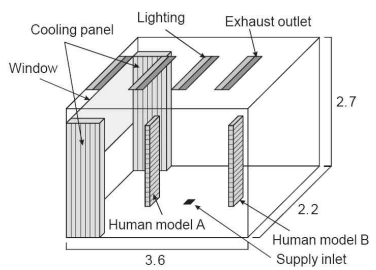
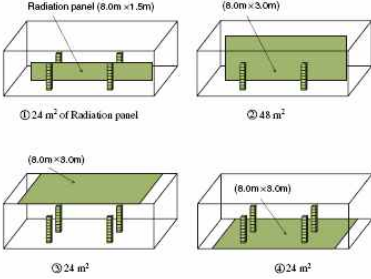
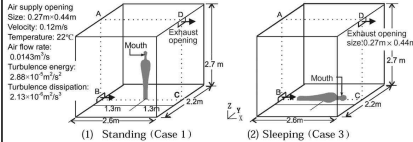
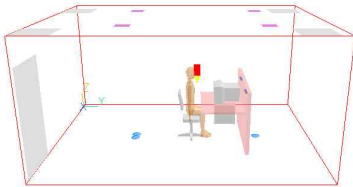
80) Peter Lyons, Op. cit., 2000

81) Wang Z. Op. cit., 2009

82) Daeuk Shin et al. A Study on the Energy Balancing System and Operation method, The 1st Seminar on Renewable Energy and Indoor Air Environment for Comfort and Energy Conservation in Buildings, 2014

계 일반적으로 오피스에서 갖추고 있는 기기인 컴퓨터와 복사기, 팩스, 그 외 OA equipment 등이 있었다. 발열의 형태는 주로 직육면체나 원기둥과 같은 단순화된 모형으로 나타났으며, 실물과 유사한 형태로 모사된 경우도 있었다. 또한 특정 발열체 없이 바닥이나 천장 면에 전체 발열량 값을 주는 경우도 있었으며, 각각의 방법이 혼합된 경우도 나타났다. 이와 같은 내부발열의 모사 형태를 대표적인 케이스인 인체, 조명, 기기로 나누어 살펴보면 다음과 같다.

〈Table 3.4〉 Method of human body (people) modeling

Classification	Description	
Rectangular		
	Shinsuke Kato et al. ⁸³⁾	Taeyeon Kim et al. ⁸⁴⁾
Mock-up		
	Tatsuya Hayashi et al. ⁸⁵⁾	Vai Kuong Sin ⁸⁶⁾

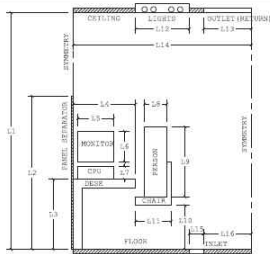
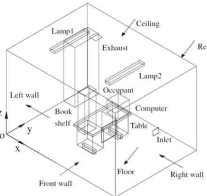
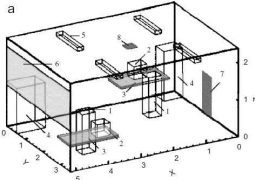
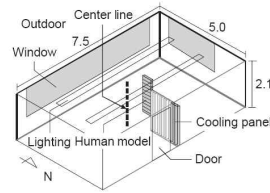
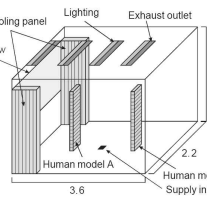
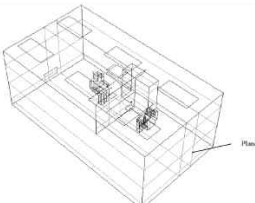
83) Shinsuke Kato et al. Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation, Building and Environment 40, 2005, pp301-310.

84) Taeyeon Kim et al, Two-step optimal design method using genetic algorithms and CFD-coupled simulation for indoor thermal environments, Applied Thermal Engineering 27, 2007, pp3-11.

85) Tatsuya Hayashi et al. CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation

인체의 경우 <Table 3.4>에서 확인 할 수 있듯이 주로 세장형의 직육면체 형태 또는 실물 모형으로 모사되었다. 열쾌적성 평가를 위해 인체를 실물과 최대한 가깝게 모사하여 열쾌적성을 평가하고자 하는 연구도 진행⁸⁷⁾되었다. 그러나 인체는 신진대사와 관련된 내부의 복잡한 알고리즘을 인체 모델에 반영할 수 없으므로 정밀한 모델보다는 인체의 발열량과 그에 따른 배출되는 에너지량을 산정하는 것에 초점을 맞추는 것이 유리하다는 결과도 제시되었다.⁸⁸⁾

<Table 3.5> Method of lighting modeling

Classification	Description		
Rectangular			
	Tolga N Aynur ⁸⁹⁾	Donghyn Lim ⁹⁰⁾	정기범 외 ⁹¹⁾
Square face			
	W.D. Cheong et al ⁹²⁾	Shinsuke Kato et al. ⁹³⁾	Atila Novoselac ⁹⁴⁾

by a human occupant, Building and Environment 37, 2002, pp219-230.



86) Vai Kuong Sin, A NUMERICAL INVESTIGATION OF INDOOR AIR QUALITY WITH CFD, 한국전산유체공학회 10, 2005, pp87-93.

87) Tomonori Sakoi et al. Heat balance model for a human body in the form of wet bulb globe temperature indices, Journal of Thermal Biology 70, pp14-25.

88) Carlos Eduardo Keutenedjian Mady et al. Modeling the exergy behavior of human body, Energy 45, 2012, pp546-553.

조명은 <Table 3.5>와 같이 천장에 주로 직육면체 형태 또는 사각면의 형태로 모사되었으며, 모사 방법에 따른 결과의 차이는 나타나지 않았으나, 건물 내부 환경에 따른 발열량의 조건이 실내 온열 환경에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

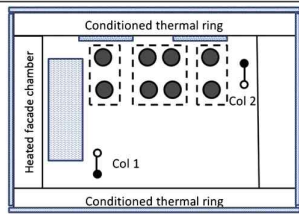
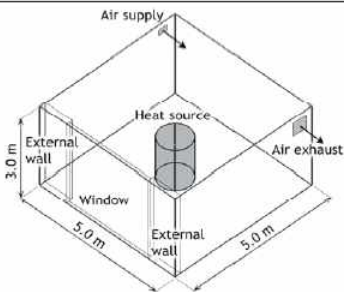
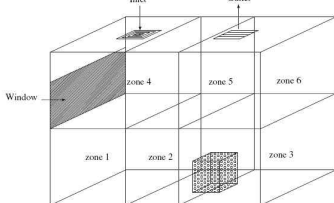
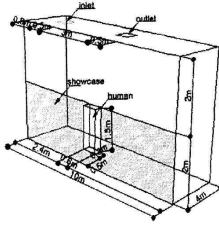
〈Table 3.6〉 Method of equipment modeling

Classification	Description	
Rectangular		
	황정하 외 ⁹⁵⁾	U. Larsson ⁹⁶⁾

- 89) Tolga N Aynur et al. Simulation of a VAV air conditioning system in an existing building for the cooling mode, *Energy and Buildings* 41, 2009, pp922-929.
- 90) Donghyn Lim, Ventilation effectiveness as an indicator of occupant exposure to particles from indoor sources, *Building and Environment* 45, 2010, 1214-1224.
- 91) 정기범 외, 칸막이 공조 급기 시스템의 냉방 특성에 대한 시뮬레이션과 실험 평가, 대한건축학회 논문집 계획계 22, 2006, pp287-294.
- 92) W.D. Cheong, Measurements and computations of contaminant's distribution in an office environment, *Building and Environment* 38, 2003, pp135-145.
- 93) Shinsuke Kato et al. Op. cit., pp301-310.
- 94) Atila Novoselac et al. A critical review on the performance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems, *Energy and Buildings* 34, 2002, pp219-230.
- 95) 황정하 외, 천장형 냉방기를 이용한 교실의 온열환경 개선에 관한 연구, 한국생활환경학회지 13, 2006, pp74-88.
- 96) U. Larsson et al. Op. Cit., pp1073-1082.

기기의 경우에도 조명과 마찬가지로 기기에서의 발열량 조건이 실내 온열 환경에 더 큰 영향을 주며, 기기의 경우에는 조명보다 발열량이 더 높고 개수도 많기 때문에 실내 온열 환경 평가 시에 기기의 발열 조건을 적절하게 구현해야 한다. 또한 자연 대류의 흐름을 분석해야 하는 경우에는 기기의 배치를 어떻게 하는지도 중요한 것으로 나타났다.

〈Table 3.7〉 Method of integrated modeling

Classification	Description	
Cylinder	 <p>● Heated cylinder (simulating the occupation and equipment load) ■ Lighting ■ Heated carpet (simulating the solar radiation) ○ Measurement column: air and resultant</p>	
	Qibin He ⁹⁷⁾	Andrius Jurelionis ⁹⁸⁾
Rectangular		
	K.C. Ng ⁹⁹⁾	S.J. Rees ¹⁰⁰⁾

97) Qibin He et al. CFD study of exhaled droplet transmission between occupants under different ventilation strategies in a typical office room, *Building and Environment* 46, 2011, pp398-408.

98) Andrius Jurelionis, Op. Cit., pp29-38.

99) K.C. Ng et al. Response surface models for CFD predictions of air diffusion performance index in a displacement ventilated office, *Energy and Buildings* 40, 2008, pp774-781.

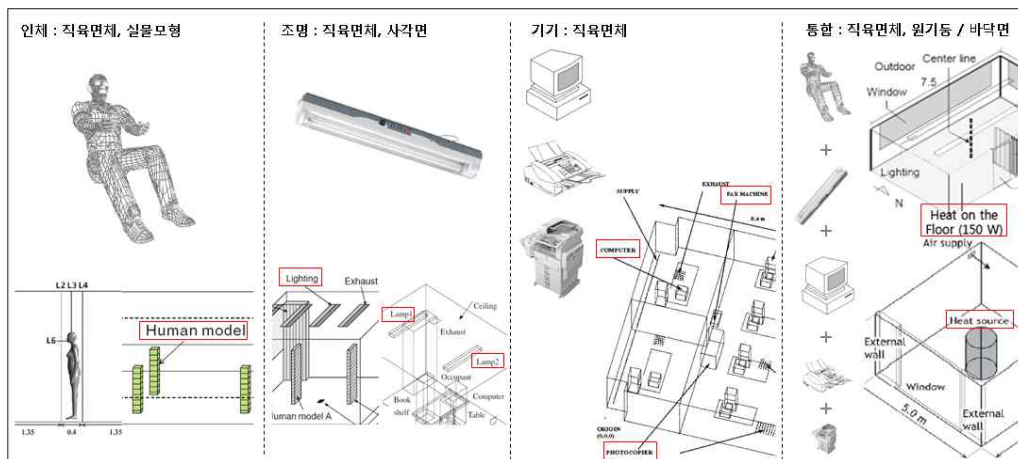
100) S.J. Rees et al., A nodal model for displacement ventilation and chilled ceiling systems in office spaces, *Building and Environment* 36, 2001, pp753-762.

인체, 조명, 기기를 세부적으로 나누어 모델링하는 경우도 있었지만, <Table 3.7>과 같이 인체와 컴퓨터를 통합거나, 실내의 모든 발열체를 통합하는 경우도 있으며, 주로 원기둥이나 직육면체 형태로 나타났다.

이와 같은 내부발열의 형태를 정리하면, [Figure 3.1]과 같다.

내부발열 요소의 선행 연구 모델링 방법을 바탕으로 모델링 방법을 분류하면, 내부발열 요소의 통합 여부, 배치 범위, 비발열체의 모사 여부로 분류할 수 있다.

내부발열 요소의 통합 여부는 인체, 조명, 기기와 같이 다양한 내부 발열원을 각각의 발열량을 합한 값을 계산하여 하나의 발열체로 통합했는지 또는 각각 모델링하여 모델별로 발열조건을 부여하여 평가하는지에 따른 분류이다. 내부발열원을 통합하여 모델링 하였을 시에는 시뮬레이션의 정밀도는 떨어지나 mesh를 구성하기 용이하고 시뮬레이션의 해석 속도가 빨라지기 때문에 높은 정밀도가 요구되지 않거나, 내부발열의 발열량에 따른 실내 온열 환경을 평가하는 경우에는 통합하여 모사하는 경우들이 나타났다.



[Figure 3.1] Modeling method of internal heat gains

배치 범위는 발열체를 단독으로 배치했는지, 여러 개로 분산시켜 배치하였는지에 대한 여부이다. 실내 온열 환경 분석 시에 자연대류의 영향을 평가하는 경우에는 발열체의 위치나 개수가 시뮬레이션 결과에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 발열체를 여러 개로 분산시켜 실내 온열 환경의 영향을 고려하거나 구체적인 평가 대상 공간이 있을 경우에는 대상 공간과 동일하게 배치하는 경우가 나타났다.

그리고 가구나 파티션 등, 발열하지 않는 물체가 시뮬레이션의 결과에 얼마나 영향을 미치느냐에 따라 비발열체 (발열하지 않는 물체)의 모델링 여부가 결정된다. 비발열체는 발열량이 없기 때문에 실의 온도 자체에는 영향을 미치지 않으나, 건물 실내에서 장애물로 작용할 수 있기 때문에 온도 분포에는 영향을 미칠 수 있다. 그리고 비발열체는 실내의 기류 분포에는 영향을 주어 downdraft와 같은 현상을 평가하는 경우에는 차가운 기류가 인체에 직접 닿아 재실자의 불쾌감을 유발하는 것을 막을 수 있기 때문에 고려해야 할 필요가 있는 경우도 있다.

이와 같이 분류된 내부발열 요소의 시뮬레이션 모델 개발 시의 필요한 항목에 따라 요소별 영향도를 평가하면 <Table 3.8>과 같다.


(가) 내부발열 모델 CASE 1 (IHG 1)

내부발열을 통합시켰으며 발열하지 않는 물체를 모사하지 않는 케이스이다. 배치 범위는 단독으로 실의 중심부에 발열체가 배치되어 있다. 정밀도가 가장 낮은 단계로 시뮬레이션의 분석결과가 발열체의 영향을 많이 받지 않는 경우에 이 방법을 적용할 수 있다.


<Table 3.8> Characteristics of modeling method

Classification of modeling method


IHG 1




IHG 2



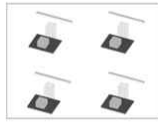
IHG 3




IHG 4



IHG 5



IHG 6



발열체1

발열체2

비발열체

통합여부	통합 O				통합 X			
비발열체 모사여부	모사 X		모사 O		모사 X		모사 O	
배치 범위	단독	다수	단독	다수	단독	다수	단독	다수
해석의 정밀도	○	○	—	—	⊙	⊙	●	●
시뮬레이션 속도	●	⊙	—	—	●	⊙	○	○
메시 형성	●	⊙	—	—	●	⊙	○	○
배치의 중요도	○	⊙	—	—	○	⊙	○	⊙
분류	IHG 1	IHG 2	—	—	IHG 3	IHG 4	IHG 5	IHG 6

배치되어 있으며, 정밀도는 중간 단계이다.

(라) 내부발열 모델 CASE 4 (IHG 4)

내부발열을 통합시키지 않고 각각 모사하였으며, 발열하지 않는 물체를 모사하지 않은 케이스이다. 배치 범위는 다수로 실에 넓게 발열체가 분산되어 있으며, 정밀도는 중간 단계이다.

(마) 내부발열 모델 CASE 5 (IHG 5)

내부발열을 통합시키지 않고 각각 모사하였으며, 발열하지 않는 물체도 모사한 케이스이다. 배치 범위는 단독으로 실의 중심부에 발열체가 배치되어 있다. 주로 한 단위의 Workstation을 집중적으로 분석할 때 이 방법을 적용한다.

(바) 내부발열 모델 CASE 6 (IHG 6)

내부발열을 통합시키지 않고 각각 모사하였으며, 발열하지 않는 물체도 모사한 케이스이다. 배치 범위는 다수로 실에 넓게 발열체가 분산되어 있다. 가장 정밀한 모사 방법으로 오피스의 전체적인 배치가 중요한 경우에 쓰이며, 급배기구의 위치 변경이나 오피스 내에 설치된 파티션이 실내 전체 기류 분포에 미치는 영향을 분석하는 등의 목적일 때 이 방법을 적용한다.

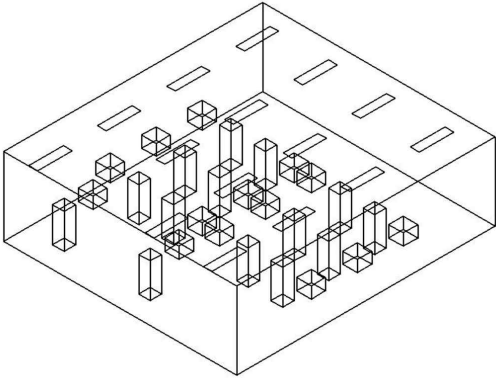
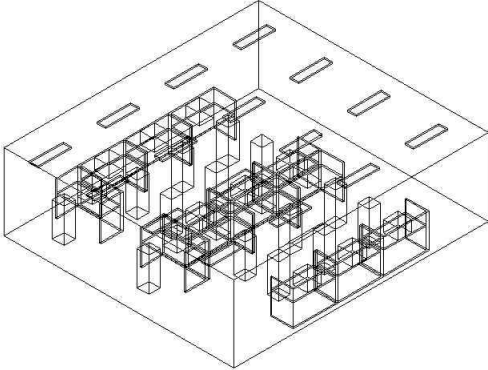
복사 난방 패널이 적용된 건물 외주부의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션에서는 내부발열에 의해 나타나는 따뜻한 공기의 흐름에 대한 반영이 필요하다. 왜냐 하면 내부 발열체에서 발생하는 열은 자연 대류의 기류 흐름이기 때문에 복사 난방 패널의 자연 대류 흐름에 영향을 줄 수 있기 때문이

다. 또한 내부발열체를 통합시킬 경우에는 인체나 조명, 기기의 발열에 의해서 발생하는 따뜻한 공기의 흐름을 시뮬레이션에서 모사할 수 없기 때문에 실제 현상과 차이가 발생할 수 있다. 즉, 냉각되어 하강하는 기류에 의한 영향으로 이러한 기류가 실내에서 발생하는 따뜻한 기류와 혼합되었을 때 어떠한 물리적 현상이 나타나는지에 대한 분석이 필요하다. 또한 자연 대류의 흐름을 평가하는 경우에는 선행 연구의 결과에서 나타났듯이 내부 발열체의 배치 범위도 실내 온열 환경 분포에 영향을 미치게 된다. 따라서 시뮬레이션 대상 모델은 내부발열에 의한 따뜻한 공기의 흐름을 반영할 수 있도록 ① 발열체를 통합하지 않고 ② 배치범위를 다수로 하여 내부 발열을 모델링하고자 한다. ③ 비발열체의 모사 여부에 대해서는 모사한 경우와 하지 않은 경우 두 가지를 모두 고려하여 내부 발열에 의해 가열된 공기의 흐름 및 내부에 파티션이 있는 경우에 대한 반영을 동시에 하도록 한다. 또한 내부 발열 모델링 시에 발열체에서 발생하는 발열량(시뮬레이션 수행시, 각 발열체에 입력되는 값)은 국외 기준 및 선행연구를 근거로 <Table 3.9>와 같이 적용하고자 한다. 이와 같은 내부 발열의 모델링에 대한 결과는 <Table 3.10>과 같다.

<Table 3.9> Input value of simulation model

Classification	Description	
	value	reference
People	70W	Seated, very light work, Sensible Heat (2009 ASHRAE Handbook)
Lighting	54.675W	오피스에서의 전체 조명 발열량 12W/m ² 을 환산
Equipment	computer : 95W	Conservative value, 모니터 포함 (2009 ASHRAE Handbook)
	printer : 110W	Conservative value (2009 ASHRAE Handbook)

〈Table 3.10〉 Selection of environment parameter model

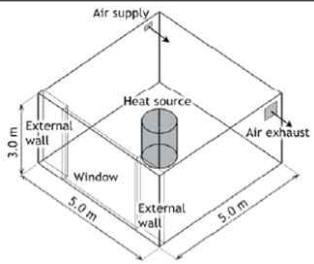
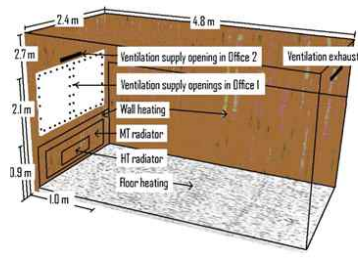
Classification		Description
내부발열 모델링 방법	통합여부	통합 X
	배치 범위	다수
	비발열체 모사 여부	-
발열체 대상		인체, 조명(천장조명), 기기 (컴퓨터, 프린터)
발열체 대상 형태	인체	직육면체
	조명 (천장조명)	동일한 크기의 면
	기기 (컴퓨터, 프린터)	직육면체
모델링 방법		
		

(2) Infiltration 모델링 방법

Infiltration은 건물의 벽체나 창문 틈새로 외부의 차가운 기류가 실내로 유입되는 현상으로, 건물에서 기밀하지 못한 부분에서 발생하기 때문에 구체적으로 어느 지점에서 어느 정도의 기류 속도로 발생하는지 확인하는 것은 쉽지 않다. 즉, 건물에서의 불확실성 요소이기 때문에 infiltration에 대한 해석은 실제와 똑같이 구현할 수는 없으므로 부하 계산시의 침기 부하 또는 환기 부하의 계산값을 시뮬레이션에 적용하거나 infiltration의 발생량을 계산하거나 건물 틈새에 외기온을 바탕으로 임의의 기류속도를 부여하여 적용하기도 한다.

그리고 infiltration은 건물 창문이나 벽체의 미세한 틈새에서 발생하기 때문에 CFD 시뮬레이션에서 mesh를 적절하게 구성하지 않으면 시뮬레이션 해석에 오류가 발생하거나 infiltration 발생을 모사한 건물의 틈새 면적보다 mesh가 크게 만들어지면 infiltration의 영향이 반영되지 않고 해석한 결과가 나올 수도 있다.

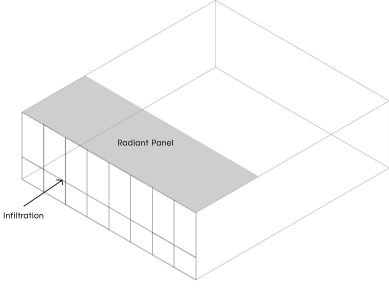
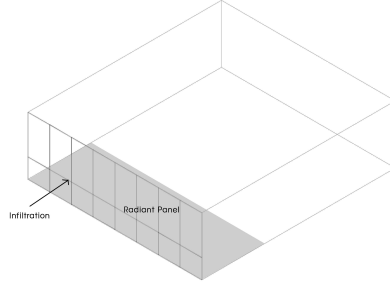
<Table 3.11> Method of infiltration modeling

Classification	Description	
hole in window		
	A. Jurelionis et al. ¹⁰¹⁾	J. A. Myhren et al. ¹⁰²⁾

101) A. Jurelionis. Op. cit., pp29-38.

102) Jonn Are Myhren. Op. cit., pp524-536.

<Table 3.12> Modeling of infiltration in this study

Classification	Description	
Infiltration Modeling		
Space conditions	<ul style="list-style-type: none"> - 전면 : All glass (창문 사이에 1mm의 틈새를 모델링) - 천장, 바닥, 측면, 후면 : Wall / Adiabatic - 복사 난방 패널 패널 : Wall / Temperature 	

따라서 이러한 infiltration을 CFD 시뮬레이션에서 모사하는 경우에는 <Table 3.11>과 같이 창문이나 벽체 주위에 일정한 틈새를 모델링한 다음에 건물에서 발생할 것으로 가정하는 침기량을 침기 횡수 등에 따라 설정한 수에 시뮬레이션 모델에 요구되는 입력값으로 계산하여 infiltration을 경계 조건을 설정한 후에 해석한다. 이에 본 연구에서는 <Table 3.12>와 같이 infiltration을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

창문 사이의 틈새에 모델링된 부분은 infiltration 조건을 반영하는 부분으로 실내 권장 환기 횡수에 따른 침기량을 외부로부터 실내로 인입한다. 따라서 infiltration 모델링 시에는 인입 공기의 온도 및 속도를 반영하며 velocity inlet 조건을 적용하도록 한다. Velocity Inlet 조건 시 필요 요소 온도 조건 (Temperature)과 실내로 유입되는 기류의 속도 (Velocity)가 있는데, 온도 조건은 인입해 들어오는 공기의 온도를 의미하며, 일반적으로 시뮬레이션 수행시의 외기조건을 적용한다. 그리고 기류 속도는 틈새 바람의 풍량을 이용하여 계산할 수 있다. 유리창 새시의 틈새나 출입구의 문에서는,

틈새바람으로서 외기가 침입하고 있지만, 그 양의 정확한 파악은 어려우므로, 임의를 틈새바람량을 가정하여 계산을 수행한다. 이와 같은 창문에서의 틈새바람을 계산하기 위한 계산법으로서는 틈새법(Crack method), 환기회수법(Air change method), 창 면적법(Air change method) 등이 있다.

틈새법(Crack method)은 창문 또는 문의 틈새 길이를 이용하여 틈새바람을 계산하는 법이며 다음과 같은 식 (3.1)로 나타낼 수 있다.

$$Q = BL \quad (3.1)$$

Q : air volume of crack [m^3/h]
 B : air volume per crack area [m^3/h]
 L : crack length of sash[m]

환기 회수법(Air change method)은 가장 일반적으로 적용되는 방법으로 문, 창 등의 사양이 불분명할 경우, 간이계산으로 구하게 되며, 건물 구조별 틈새바람에 의한 환기회수 즉, 외기에 의해 실내공기가 교환되는 회수를 이용하여 틈새바람을 계산하며, 다음과 같은 식 (3.2)를 이용한다.

$$Q = nV \quad (3.2)$$

n : number of air change per hour [number/h]
 V : volume of indoor space [m^3]

면적법(Area method)은 저층(높이 30m이하) 건물에서 창문으로의 틈새 풍량 계산에 사용한다. 식 (3.3)과 같이 창문(또는 문)의 면적을 이용하여 틈

새바람을 계산하기 때문에 창문 새시의 형상과 단위 면적당 틈새 풍량을 데이터가 주어져야 정확한 계산이 가능하다.

$$Q = DA \quad (3.3)$$

D : air volume of crack per area [m^3/h]
 A : window (or door) area [m^2]

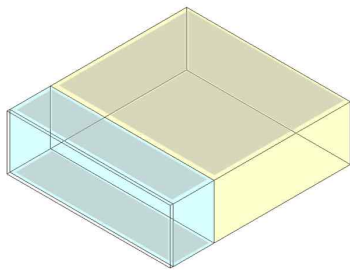

본 연구에서는 외기에 의해 실내공기가 교환되는 횟수를 이용하여 틈새바람을 계산하는 방법으로 환기횟수법을 적용하였다. 난방 부하 계산시, 건물의 기밀성에 따라 환기횟수를 정하여 침기 부하를 계산하며, 실의 환기 횟수에 대한 가정은 일반적으로 통용되는 방법이므로 환기 횟수법을 활용하여 시뮬레이션에서 모델링된 infiltration의 velocity inlet 조건을 설정하는 것이 가장 적절한 방법으로 판단된다.

3.1.3 복사 난방 패널의 설계 요소 모델링 방법

복사 난방 패널의 모델링은 패널의 위치(천장 또는 바닥)나 면적, 방열량(또는 표면온도)에 따라 어느 정도의 효과가 있고 어느 정도까지 적용해야 하는지에 대한 분석이 수행되어야 한다. 이러한 분석을 위해 패널의 위치와 면적, 방열량을 반영할 수 있도록 <Table 3.13>과 같이 모델링하였다. 대상 공간은 외주부와 내주부를 구분하여 내부주에는 복사 난방 패널을, 외주부에는 복사 냉방 패널을 설치하였으며, 외주부의 면적은 외주부에 적용되는 복사 난방 패널의 면적에 따라 달라지도록 하였으며, 난방을 위한 경우에는 천장 및 바닥면 전체에 적용 가능하도록 하였다.

그리고 복사 패넬이 외주부에 적용되는 경우에는 복사 난방 패넬을 천장이나 바닥 또는 천장과 바닥에 동시에 적용될 수 있도록 하였으나, 내주부에 적용되는 복사 냉방 패넬의 경우에는 내주부의 천장에만 적용될 수 있도록 하였다. 이는 사무소와 같이 인체, 조명, 기기와 같은 발열체와 책상 및 파티션과 같은 비발열체가 있는 공간에서는 바닥 복사 냉방 패넬의 경우에는 실내 공간 내의 장애물 및 밀도가 높은 차가운 기류의 상승 효과가 적어서 냉방 효율이 떨어진다는 기존 연구 결과¹⁰³⁾를 근거로 하였다.

〈Table 3.13〉 Modeling of radiant heating panel

Classification	Description	
Panel Modeling	 <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 10px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></div> Interior zone <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: cyan; margin-right: 5px;"></div> Perimeter zone <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: grey; margin-right: 5px;"></div> Radiant panel </div>	
	Perimeter Zone	천장 / 바닥 / 천장 + 바닥
Position of panel	Interior Zone	천장
	 <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 10px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></div> Interior zone <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: cyan; margin-right: 5px;"></div> Perimeter zone <div style="width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Radiant panel </div>	

103) So Jeong Park et al. A Study on the Application Method of Radiant Heating Panels to Prevent Downdraft in Glass Curtain-wall Buildings, International Building Physics Conference, IBPC 2012

3.2 시뮬레이션 모델 구축

복사 난방 패널은 자연 대류의 원리를 이용하여 방열하고, 침기나 내부 발열과 같은 건물의 실내외 환경 요소도 자연 대류의 원리로 재실자의 쾌적성에 긍정적 또는 부정적으로 영향을 미치므로 건물 환경 요소의 변화에 따른 온도 및 기류 해석을 정밀하게 해석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램이 필요하다. 또한 복사 난방 패널은 복사열교환 효과에 의해 쾌적성을 향상시키거나 또는 복사불쾌적을 발생시킬 수 있으므로 복사 열전달 해석을 통한 재실자의 열쾌적성 평가가 가능한 프로그램이어야 한다. 이에 건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위해서 CFD 시뮬레이션 상용프로그램인 STAR-CCM+12.02를 선정하여 연구를 수행하였다. STAR-CCM+는 특화된 대류, 전도, 복사 모델을 통하여 유체 및 고체의 열전달 현상을 정교하게 예측할 수 있으며, 자동 메쉬 기능을 통하여 계산 시간을 단축시키고 해석 성능을 향상시킬 수 있다.¹⁰⁴⁾ 따라서 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하기에 적합한 해석 도구라 할 수 있다.

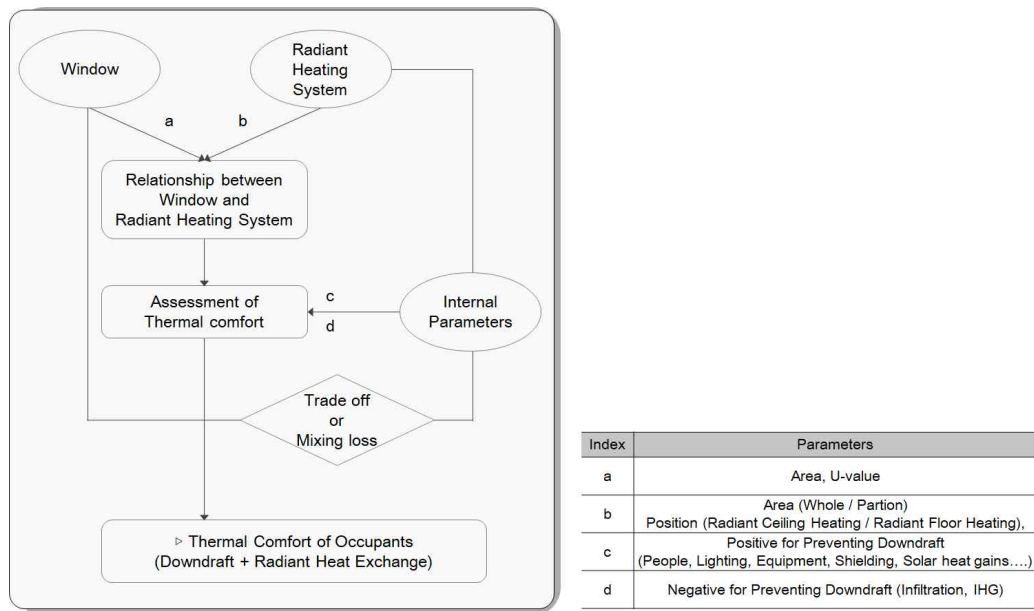
시뮬레이션의 수행에 있어 앞서 열쾌적성 평가에 필요한 건물의 실내외 환경 요소 및 복사 난방 패널의 설계 요소들 간의 영향도에 따라 시뮬레이션에서의 입력 방법을 선정하였다. 이를 바탕으로 대상 공간의 형상 및 물성치와 패널의 배치 범위 및 표면 온도를 결정하였으며, 또한 건물 실내외 환경 요소의 형상 및 난방 부하 모델링 조건을 도출하였다. 그리고 도출된 모델을 대상으로 열쾌적성 평가를 수행하기에 적절한 계산 모델을 선정함으로써 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 이와 같은 과정을 통해 개발된 시뮬레이션 모델은 실험실에서의 온도 및 기류 분포를 측정한 실험과의 검증을 수행하여 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

104) Star-CCM+. Tutorial Guide; Siemens Inc, 2017

3.2.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션

건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가는 외부환경조건과의 차이로 인한 실내의 열환경 변화와 실내 환경 요소의 영향, 그리고 냉난방 부하의 제거 및 열쾌적성 확보를 위한 복사 난방 시스템의 방열량을 고려하여 평가해야 한다. 따라서 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션은 2.3절에서 제시된 바와 같이 복사 난방 패널의 복사열로 창문이 가열되는 효과와 외기의 영향으로 인한 창문의 온도 구배를 해석할 수 있어야 하며, 침기나 내부발열과 같은 건물의 실내외 환경 조건 및 복사 난방 패널의 방열로 인한 자연대류 현상을 구현할 수 있어야 한다. 이를 위해서 시뮬레이션은 [Figure 3.2]와 같이 복사 난방 패널의 설계 요소와 외부환경을 영향을 반영할 수 있는 창문의 요소 그리고 재실자의 열쾌적성에 긍정적으로 또는 부정적으로 영향을 주는 실내 환경 요소를 반영하여 대상 공간이 구성될 수 있도록 하였다.

복사 난방 패널을 외주부에 적용할 경우, 먼저 복사 난방 패널이 실제로 난방부하를 처리하고 열쾌적성을 확보할 수 있는지 평가해야 한다. 이를 위해서 차가운 창문 표면에 의해서 발생된 차가운 기류의 자연대류 하강 흐름과 복사 난방 패널에서 방열되는 열 사이의 관계성 즉, 창문 측의 차가운 기류와 복사난방의 따뜻한 기류의 혼합 특성을 분석해야 한다. 이는 외부환경 조건에 따라 요구되는 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하기 위한 과정으로 외주부 시스템으로서의 복사 난방 패널의 적용 가능성을 판단을 위해 차가운 창문의 영향과 난방부하와 관련하여 재실자의 열쾌적성에 부정적인 영향을 주는 건물의 외부 환경 요소를 반영하여 평가를 수행하고, 이를 바탕으로 건물의 실내 환경 요소를 고려한 평가를 수행하고자 한다.



[Figure 3.2] Parameters for assessment of thermal comfort

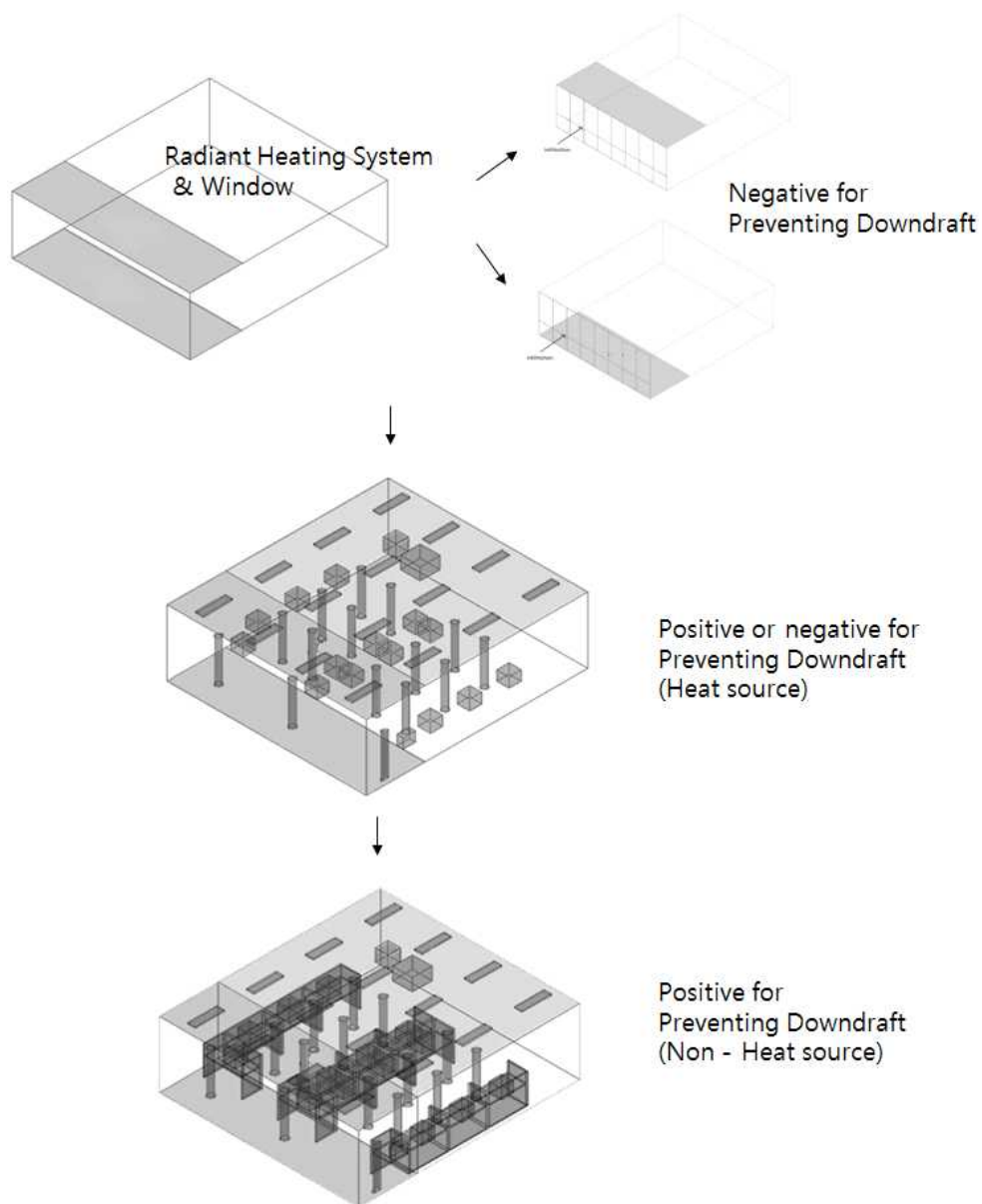
그리고 복사 난방 패널은 난방부하는 처리할 수 있으나, 실내 내부발열이 높을 경우에는 난방 기간에도 냉방부하가 발생하여 냉방부하가 채실자의 쾌적성에 영향을 주게 되면, 외주부에 적용된 복사 난방 패널 외에 내주부에 냉방부하를 처리하기 위한 복사 냉방 패널을 적용하여 냉방 부하를 처리해야 할 수도 있다. 냉난방 부하를 제거해야 하는 열량으로 보는 관점에서는, 난방부하와 냉방부하가 동시에 발생할 경우에는 각 부하의 값을 trade-off 하여 이에 필요한 방열량 또는 방냉량만 공급하면 되어 외주부에서의 난방이 필요없다고 판단할 수 있다. 그러나 채실자의 열쾌적성 관점에서 보면, 외주부에 따라 난방을 하지 않게 되면, 차가운 창문과 이에 따른 기류의 영향으로 채실자의 불쾌적이 발생할 수 있다. 따라서 외기온이 낮은 난방 기간에는 채실자의 쾌적성을 위해서 일정한 열을 지속적으로 공급해주어야 하며, 냉방부하를 동시에 처리하기 위해서는 난방부하와 냉방부하에 따라 복

사 난방 패널의 적절한 방열 조건을 설정해 주어야 한다.

예를 들어, 난방부하가 냉방부하보다 큰 경우에는 냉방부하로 trade-off된 난방부하를 처리하기 위해 필요한 열량만 방열하여도 재실자의 열쾌적성을 확보할 수 있다면 이에 적합한 복사 난방의 방열 면적과 표면온도를 정하여 방열 조건을 설정하는 것이 부하 제거 관점 및 재실자의 쾌적성 관점에서 가장 유리하다고 할 수 있다. 그러나 난방부하가 냉방부하보다 작은 경우에는 냉난방 부하의 저감 관점에서는 냉방부하만 처리하면 되지만 차가운 창문의 영향으로 인해 재실자의 불쾌적이 발생할 수 있으므로 복사 난방 패널과 복사 냉방 패널을 설치하여 난방부하 자체의 저감 및 쾌적성 확보를 위한 난방과 냉방 부하 저감을 위한 냉방을 동시에 수행하여야 하며, 이때 적절한 복사 난방 패널의 방열량과 방냉량은 열쾌적성을 만족시킬 수 있는 범위 내에서 최소한의 에너지를 소비할 수 있는 열량이 제시되어야 한다. 또한 복사 난방 패널과 복사 냉방 패널을 동시에 적용하게 되면, 각각의 패널에서 방열 또는 방냉하는 복사열을 제거해야 하는 부하로 판단하여 요구되는 열량 이상을 공급하여 에너지 소비량을 증폭시키는 혼합 손실이 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 이와 같이 복사 난방 패널이 외주부에 적용되었을 경우 평가 대상에 따라 다른 공간 모델이 적용이 되므로, [Figure 3.3]과 같은 과정을 통하여 시뮬레이션의 대상 공간을 설정하였다.

3.2.2 시뮬레이션 모델 개발

3.1 절에서 도출된 건물의 실내외 환경 요소 및 복사 난방 패널의 설계요소를 통합하고, 각 모델별 시뮬레이션 수행에 필요한 입력값을 도출하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다.



[Figure 3.3] Schematic description of a room for the simulation

(1) 대상 공간의 형상 및 물성치

본 연구에서는 복사 난방 패널이 적용된 건물 외주부에서의 열쾌적성 평가 결과가 일반적으로 적용 가능한 데이터로서의 가치를 지닐 수 있도록 가장 표준적이라 할 수 있는 공간 범위를 설정하여 시뮬레이션 대상 공간으로 선정하였다. 그리하여 너비 8.1m, 깊이 9.0m, 높이(층고) 2.7m의 치수를 대상 공간의 형태로 최종 결정하였으며, 1면이 외기에 접하고 창문만 있는 공간을 대상으로 하였다. 차가운 외부의 영향에 따른 열쾌적성에 초점을 맞추어 평가하기 위해 대상 공간에서 문은 없는 것으로 가정하였다.

대상 공간은 창문을 통해서만 외부와의 열교환이 이루어지기 때문에, 외부 환경 조건의 반영을 위해서는 창문의 크기를 설정하는 것이 매우 중요하다. 차가운 표면인 창문으로부터 형성된 기류는 바닥면을 타고 오는 흐름에 의해 바닥면 근처에서 주로 발생하게 되며, 바닥면을 타고 재실영역으로 흐르는 기류의 속도는 창문 근처에서 형성되는 차가운 기류의 하강 속도에 영향을 받는데, 창문 근처에서 기류의 최대속도는 창문의 표면온도가 낮을수록, 창문의 수직 높이가 높을수록 높아지게 된다. 따라서 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 시 창문의 온도를 반영할 수 있는 창문의 열관류율과 수직 높이의 변화가 가능하도록 대상 공간에 창문을 설정하는 것이 필요한데, 창문의 열관류율은 시뮬레이션에서의 입력값이므로 시뮬레이션 Case에 따라 입력값을 다르게 하면 조절이 가능하지만, 창문의 수직높이는 대상 공간의 모델에 적용해야 하는 부분으로 창문의 높이에 따른 Case 변화는 대상 공간 모델에서 창문의 모델을 조절해서 적용해야 한다. 이를 위하여 창문의 높이는 창면적비에 따른 대상 공간을 설정하여 반영하였다.

창면적비는 우선, 차가운 창문으로 인한 재실자의 불쾌적이 발생할 가능성이 높은 상황에서 복사 난방 패널을 적용하였을 때 재실자의 열쾌적성을

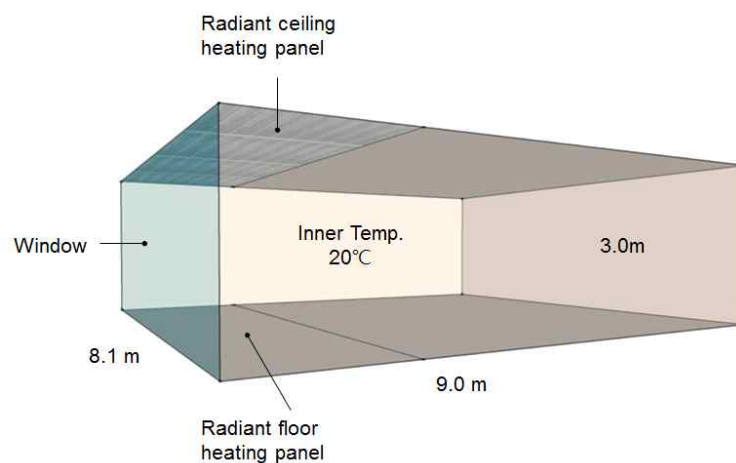
확보할 수 있다면, 이보다 좋은 상황에서는 불쾌적이 발생하지 않을 것이라는 가정으로 외기에 면하는 면 전체가 창문 즉, 외벽부분의 창면적비가 100%인 조건을 기존의 대상 공간으로 설정하였다. 그리고 인접한 실과의 열교환은 없는 것으로 가정하였으며, 시뮬레이션 모델에서 창문이 적용된 면과 복사 난방 패널이 적용된 면을 제외한 나머지 면은 단열 경계 (Adiabatic boundary) 조건으로 설정하여 표면을 통한 열 출입이 없도록 하였다. 또한 표면의 방사율은 복사 난방 패널의 방영량을 계산하는 실험 방법에서 적용되는 값인 0.9로 설정하였다. 이와 같은 대상 공간의 형상은 [Figure 3.4]와 같다.

열 쾌적성 평가를 위한 대상 공간은 재실자가 상주하는 재실영역과 시스템이 설치되거나 책장 등으로 사용되는 비재실영역으로 구분할 수 있다. 일반적인 재실영역은 EN 기준¹⁰⁵⁾에 따르면 [Figure 3.5]와 같이 바닥면에서 1.8m, 외벽 및 창문으로부터는 1.0m, 내벽으로부터는 0.5m 떨어진 영역을 재실영역으로 판단한다. 따라서 열 쾌적성을 평가하는 경우에는 재실영역 내에서의 열 쾌적성을 확보하는 것이 중요하므로 재실영역으로 설정된 공간에서의 열 쾌적성을 중심으로 평가를 수행하고자 한다. 다만 비재실영역에서의 온도 및 기류 분포가 재실자의 쾌적성에 영향을 미치는 요인으로 작용할 수도 있으므로 실내 온열 환경 분포는 영역에 상관없이 평가를 수행한다.

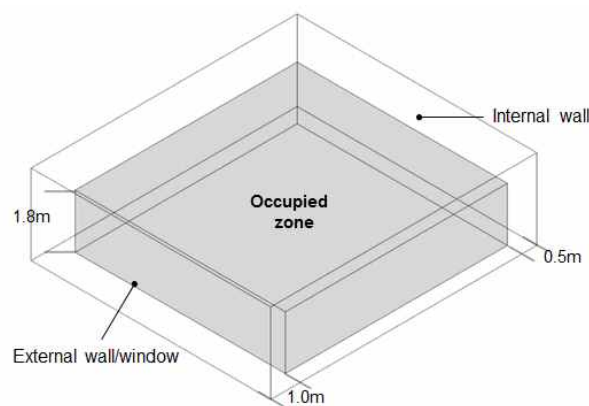
그리고 본 연구는 복사 난방 패널을 외주부에 적용하여 열 쾌적성을 평가하는데 외주부와 내주부, 재실영역과 비재실영역을 개념을 명확하게 설정하여 평가할 필요가 있다. 외주부를 비재실영역, 내주부를 재실영역으로 판단하여 동일한 개념으로 평가를 하기도 하지만, 외주부에 적용되는 복사 난방 패널을 본 연구에서 설정된 비재실영역에만 적용하게 되면, 적용범위가 너

105) BS EN 15377-1 : Heating systems in buildings. Design of embedded water based surface heating and cooling systems, 2008

무 작아서 복사 난방 패널의 방열 조건에 제한이 따르며, 이는 실제 복사 난방 패널의 적용 가능성을 판단하기에 적절하지 않을 수 있다. 즉, 복사 난방 패널은 천장이나 바닥면에 적용되기 때문에 기존의 FCU나 Convactor와 같은 외주부 시스템과 달리 실내 공간에서 일정한 면적을 차지하지 않으므로 채실영역과 비채실영역의 구분 없이 설치가 가능하다.



[Figure 3.4] Room dimension for simulation

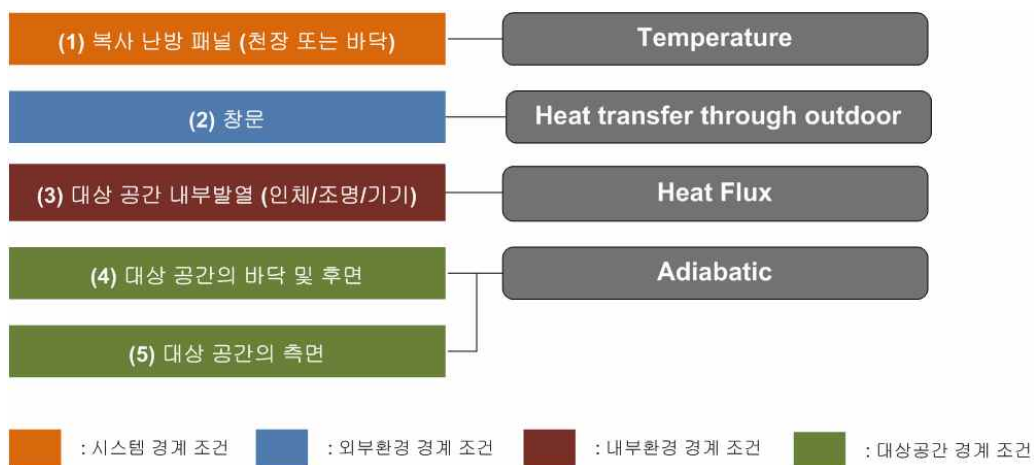


[Figure 3.5] Occupied area

따라서 본 연구에서는 외주부는 난방부하를 담당하고 외주부의 열적특성으로 인한 재실자의 불쾌감을 저감하는 영역, 내주부는 내부발열과 같은 실내에서 발생하는 냉방부하를 담당하는 구역으로 정의하였다. 그리고 재실영역은 동일하게 재실자가 머무르는 공간의 개념으로 사용되지만, 외주부와 비재실영역은 동일한 의미가 아닌 다른 개념으로 본 연구에서 사용된다.

(2) 복사 난방 패널의 및 대상 공간의 경계조건

본 연구에서는 복사 난방 패널의 배치 및 적용 면적이 열쾌적성에 영향을 미치는 영향을 평가해야 하므로, 이와 같은 패널의 배치 및 면적을 조작변인으로 설정하였으며, 냉난방부하에 따른 복사 패널의 적정 방열량을 산정하고 이때의 표면온도를 계산하여 대상 공간에 패널의 면적을 설정하고 이에 따른 표면온도를 입력하여 방열량을 모사할 수 있도록 [Figure 3.6]과 같이 설정하였다.



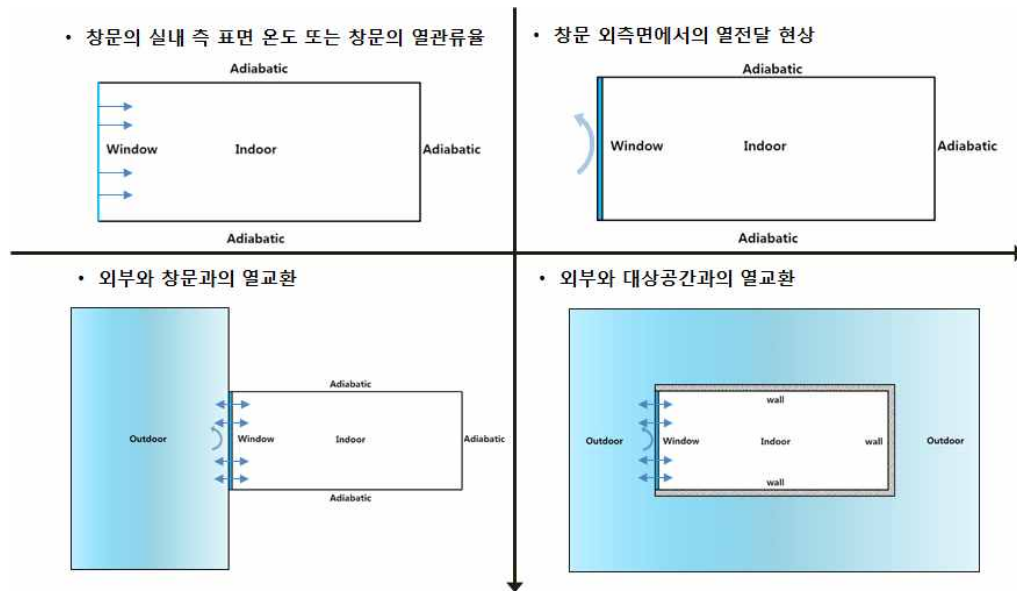
[Figure 3.6] Description of boundary conditions

복사 패널의 면적은 창문의 높이와 마찬가지로 대상 공간에서 설정되어야 하는 요소이므로 패널이 설치되는 공간을 0.5m 단위로 구획하여 패널의 면적에 따른 표면 온도를 입력하도록 하였다. 즉, 패널의 너비는 대상 공간의 너비와 동일한 8.1m로 항상 적용되고, 패널의 깊이는 적용되는 패널의 면적에 따라 달라지도록 하였으며, 이때 패널로 설정된 부분은 패널의 방열량에 따른 표면온도를 입력하고, 패널로 적용되지 않은 부분은 단열조건(adiabatic boundary)으로 설정하여 패널의 방열량을 모사하였다.

(3) 건물 환경 요소 형상 및 난방 부하 모사 조건

재실자의 쾌적성에 영향을 미치는 건물의 실내외 환경 요소는 3.1.3절에서 제시된 모델링 방법에 따라 대상공간에 적용된다. 조명은 prototype으로 선정된 대상 공간과 동일하게 5개의 조명이 4줄로 적용되어 총 20개의 조명이 적용되었으며, 인체 및 기기는 둘다 내부 공간에서의 발열체로 판단하여 원통의 형태로 재실인원 한명당 기기 하나로 산정하고 인체와 기기의 발열량을 합한 값을 적용하여 총 12개가 배치되었다. 또한 비발열체의 경우에도 마찬가지로 인체와 기기가 배치된 위치에 동일하게 배치하였다.

외부의 영향을 반영하기 위한 난방 부하 조건은 복사 난방 패널과 외부 환경에 따른 열쾌적성을 평가한 기존 연구의 한계를 개선할 수 있도록 설정하였다. 2.3절의 기존 복사 난방 패널의 열쾌적 평가 분석 결과에 따르면, CFD 시뮬레이션을 활용하여 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하는 경우에는 창문의 표면온도를 고정된 조건으로 적용하지 않고, 실제 상황과 유사하게 창문에서의 온도 구배가 형성될 수 있도록 하여 하강기류로 인한 창문 표면의 수직면 온도 편차 및 복사열교환으로 인한 창문의 온도상승효과를 고려해야 한다.



[Figure 3.7] Modeling method of outdoor environment

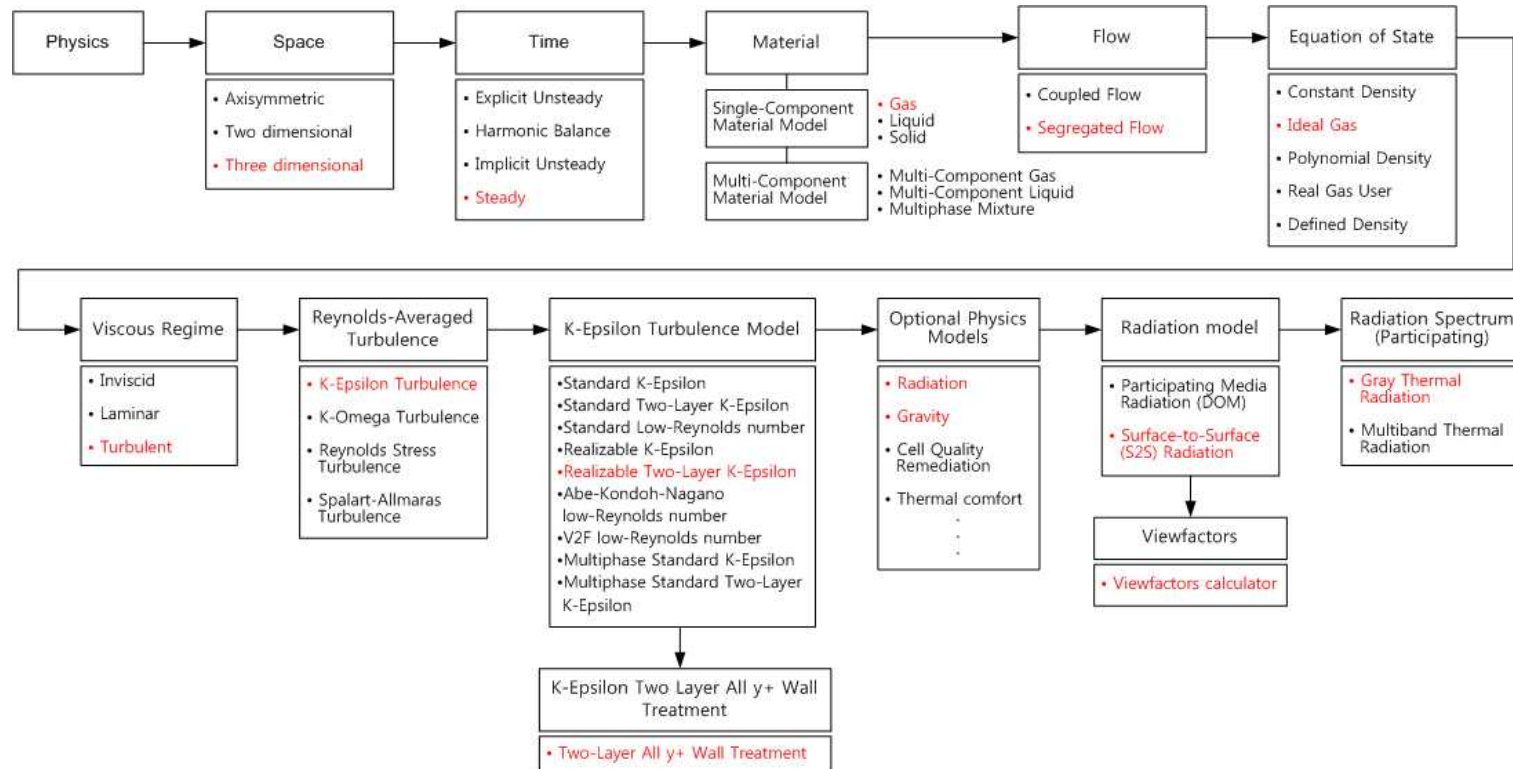
즉, 외부환경에 면하는 창문을 통한 열전달 현상을 정확하게 모사하고 외부환경을 상세하게 반영할수록 시뮬레이션 결과값의 정확도가 향상된다고 할 수 있다. CFD 시뮬레이션에서 창문을 통한 외부 환경의 모사 방법은 [Figure 3.7]과 같이 창문의 실내 측 표면 온도 또는 창문의 열관류율을 입력하는 방법, 창문 외측면에서의 대류 열전달 계수를 적용하여 외부로의 열 손실을 모사하는 방법, 외부와 창문과의 열교환을 반영하는 방법 그리고 외부와 대상공간 전체와의 열교환을 반영하는 방법으로 구분할 수 있다.

창문의 실내 측 표면온도 또는 창문의 열관류율을 입력하는 방법은 창문을 고정된 조건으로 판단하므로 창문과 복사 난방 패널의 복사열교환 효과로 인한 창문 표면의 온도 편차를 모사할 수 없으므로 본 연구에서 외부환경의 모사 방법으로 적절치 않다. 또한 외부와 대상공간 전체와의 열교환을 통해 외부 환경을 모사하는 방법은 창문 측을 제외한 나머지 벽면은 단열조

건으로 설정하여도 충분한 상황에서 mesh의 복잡함과 시뮬레이션 오류의 가능성으로 효율적이지 않으므로 열쾌적성 평가에 적절하지 않으므로 제외하였다. 따라서 시뮬레이션 수행 속도 향상 및 mesh 형성에 유리하여 일반적으로 사용되는 방법인 창문 외측면에서의 대류 열전달 계수를 적용하여 열전달 현상을 평가하는 방법, 그리고 외부 환경과 창문과의 열교환을 반영하는 방법 중 향후 시뮬레이션 검증에서 오차가 적은 방법을 시뮬레이션에서 난방 부하를 모사하는 조건으로 사용할 수 있는데, 열전달 계수와 같이 경험적 수식을 통하여 도출된 값을 시뮬레이션상에 입력하여 사용하는 것보다는 실제 외부환경과 창문과의 열교환을 모사하는 것이 시뮬레이션의 정확도를 향상시킬 수 있다고 판단하였다. 이에 따라 난방 부하 조건의 모사를 위해서 외부와 창문과의 열교환을 모델링하여 열쾌적성을 평가하고자 한다.

(4) 계산 모델 (numerical models)

열쾌적성 평가를 위해 모델링한 공간은 복사 패널과 및 벽체와 외부와 열교환을 수행하는 창문으로 구성된 형태이며, 복사 패널의 방열/방냉 조건 및 외부환경에서 전도를 통한 실내 측 창문 표면에서의 대류 열전달과 침기, 실내 환경 요소의 발열에 따라 대류의 형태로 열교환이 이루어지고, 온도가 다른 공기 간의 밀도차로 인해 공간 내에서의 열유동이 발생한다. 또한 복사 패널과 창문, 실내 환경 요소 및 공간의 표면 사이에서 서로 간에 복사의 형태로 열에너지를 교환한다. 따라서 STAR-CCM+를 활용하여 이러한 공기 유동과 열에너지 교환 등을 계산하여 실내 온열 환경 분포 및 이에 따른 열쾌적성을 평가하기 위해서는 적절한 계산 모델을 선택하여 하며, 본 연구에서는 [Figure 3.8]과 같은 계산 모델을 선택하여 시뮬레이션을 수행하였다.



[Figure 3.8] Selection flow chart of calculation models in STAR-CCM+

- Space

Star ccm+에는 세 가지의 Space 모델이 존재한다. 본 연구에서는 사무소 건물의 공기 및 열의 흐름에 따른 재실자의 열쾌적성을 평가하고자 하므로 ‘Three dimensional’을 선택한다.

- Time

특정한 조건 즉, 외부환경과 그에 따른 패널 조건에서의 열쾌적성을 평가하는 것이므로 정상상태인 ‘Steady’로 해석한다.

- Material

Material에서 Single-Component Material Model은 공기, 물, 알루미늄과 같은 순수한 물질을 모델링한다. 본 연구는 실내를 채우고 있는 공기 유동에 대한 시뮬레이션이므로, ‘Gas’이며 ‘Single - Component Material Model’에 속한다.

- Flow - 요구되는 solver type의 선택

Segregated 알고리즘은 Coupled에 비해 메모리를 더 적게 차지하며, 압축성 흐름이 아닐 경우에는 Coupled Flow를 선택할 필요가 없다. 본 연구에서는 외부환경과 시스템의 영향만을 판단하기 위하여 비압축성/비점성 유체인 이상기체로 가정하였으므로, ‘Segregated flow’ 모델을 선정하였다.

- Equation of State

Equation of State는 밀도 및 온도, 압력에 관한 밀도의 파생물을 계산하는데 사용되는데, 밀도차에 의한 부력을 모사할 수 있도록 ‘Ideal gas’를 선

정하였다.

- Viscous Regime

점성의 성격을 나타내는 Viscous Regime으로는 다음의 flow type들이 있다. 점성의 흐름은 층류 또는 난류로 분류된다. 공간에 불규칙적인 움직임을 가진 공기가 존재하므로 ‘Turbulent’를 적용한다.

- Reynolds-Averaged Turbulence

turbulence model은 난류 흐름의 방정식을 제공한다. 난류가 강하게 발생하는 등 복잡한 계산이 요구되지 않는 상황이므로, 이 중 일반적인 산업 유형에 가장 적합한 ‘K-Epsilon Turbulence model’을 선택한다.

- K-Epsilon Turbulence : 이 모델은 전달방정식이 난류의 운동 에너지 k 와 난류의 소멸율 ε 로 인해 풀이되는 두 방정식 모델이다. 점성의 Sublayer 부분을 해결하기 위해 Low-Reynolds number와

- * Two-layer : 이 접근법에서는 계산이 두 개의 Layer로 나누어져 수행된다. 벽에 가까운 layer에서는 난류의 소멸율 ε 과 난류 점성 μ_t 이 벽 거리의 함수로 지정된다. 가까운 벽면 layer에 지정된 ε 값은 벽에서 먼 곳으로부터 수송되어온 방정식의 해결에서 계산된 값과 혼합된다.

- K-Epsilon Turbulence Model

다음은 선택 가능한 K-Epsilon Model과 wall treatment이다. Standard K-Epsilon Model과 Realizable K-Epsilon model은 wall-cell y^+ 값이 30 이상인 굵은 메쉬에 적합하다. Realizable model은 일반적으로 Standard model보다 더 나은 결과를 제공한다. 주어진 상황에서 사용하는 난류 모델

에 어느 정도 불확실성이 있다면 Realizable Two-Layer K-Epsilon model 이 가장 합리적인 선택이 될 것이다. 따라서 'Realizable Two-Layer K-Epsilon model'을 적용한다.

▪ Optional Physics Models

열쾌적성 평가를 위한 기류 및 온도의 흐름, 이에 따른 부력을 정밀하게 모사할 수 있도록 'Gravity'와 'Radiation'을 추가적으로 선정하였다. 여기서 radiation model에서는 Surface-to-Surface (S2S) Radiation을 선택하고 여기에 viewfactor calculator를 적용하여 형상계수에 따른 복사열교환을 계산할 수 있도록 하였다.

- Surface-to-Surface (S2S) Radiation : only available for three - dimensional space, 닫힌 집합을 형성하는 확산 표면과의 열복사 교환을 시뮬레이션 할 수 있게 해준다. surface 사이의 공간을 채우고 있는 매체는 흡수, 방출, 산란 복사에 모두 비참여하는 매체이다. 이러한 환경에서 각각의 surface 사이에서 받거나 방출하는 복사량은 surface의 복사 특성과 부과되는 열 경계 조건에 의해 고유하게 정의된다. surface의 특성은 방사율, 반사, 투과율 및 복사온도의 측면에서 측정된다.

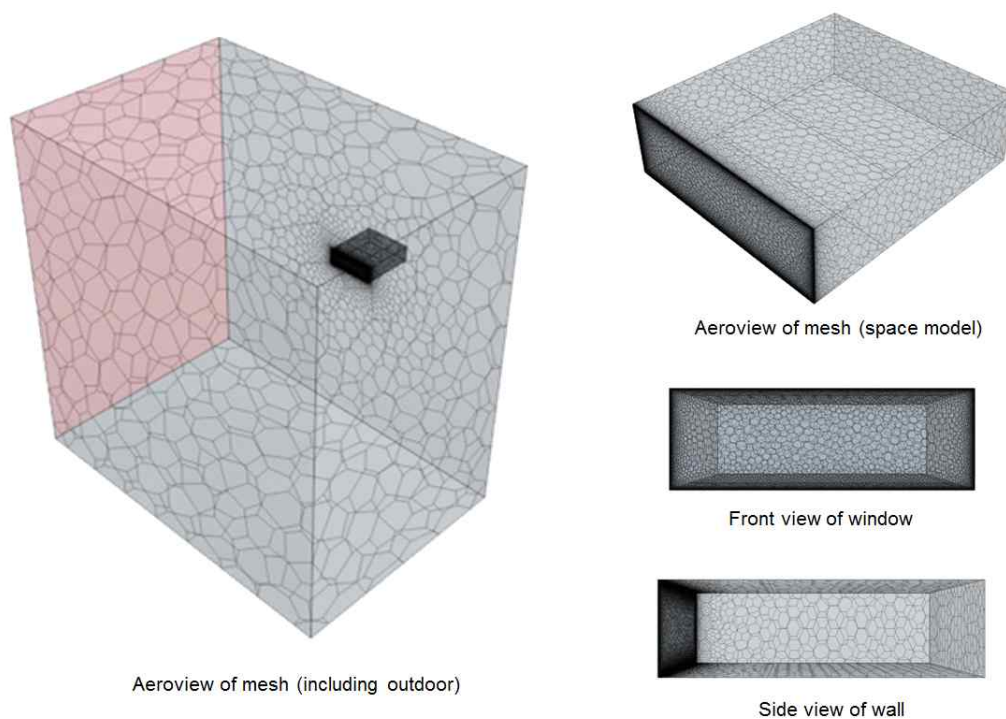
그리고 radiation spectrum에서는 복사 파장 스펙트럼이 전달 모델의 컨텍스트 내에서 고려되는 방법을 정의하며, 이를 위하여 'Gray thermal radiation'을 적용하였다.

- Gray Thermal Radiation : 파장-무의존 복사 특성 모델링, Radiation properties의 파장에 변화가 없다면 복사는 Gray라고 불리게 된다. Gray radiation 은 Gray Thermal Radiation model을 이용하여 모델링된다. 모든 열 스펙트럼에서 single radiative transfer solution 만이 필요함. 전체 열 파

장 영역은 전체적으로 간주되며 모든 복사 특성이 단일 스펙트럼 내에서 불변으로 간주된다.

(5) 메쉬 모델 (mesh model)

mesh 모델은 [Figure 3.9]와 같이 Polyhedral mesher로 구성하였고, 실내 환경 분석을 위한 mesh의 수는 cell 587,254개, face 4,006,434개, vertice 3,546,416개이다. 창문 각각의 레이어(유리면과 중공층)와 외부환경부터 창문을 거쳐 실내 공간까지의 경계면 및 모서리 부분과 같이 세밀하게 메쉬가 구성된 부분을 포함해서 메쉬 형상이 무너지거나 엉키지 않고 적절하게 구성되었으며, 오류도 발생하지 않았다.



[Figure 3.9] Generation of mesh model

3.2.3 시뮬레이션 모델 검증

건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 시뮬레이션 평가를 수행하기에 앞서 평가 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 시뮬레이션 모델에 대한 검증을 수행하였다. 시뮬레이션 모델에 대한 검증은 건물 외주부가 외부 환경의 영향을 받아 차가워진 창문의 조건과 이에 따른 차가운 공기의 하강 기류 현상을 정확하게 모사하는지, 즉 차가운 창문으로 인해 외주부에서 발생하는 자연대류 현상을 반영할 수 있는지 그리고 복사 난방 패널의 방열로 인한 실내에서의 기류 현상을 구현할 수 있는지 평가하기 위해서 인공기후 실험실에서 차가운 창문과 창문 아래의 가열면에 따른 온도 및 기류 분포를 분석한 선행 연구 결과를 대상으로 본 시뮬레이션 모델에 대한 검증을 수행하였다. 그리하여 선행 연구의 실험 결과값과 본 연구에서의 시뮬레이션 계산 결과 사이의 오차값을 계산하여 시뮬레이션의 신뢰도를 제시하였다.

(1) 검증 방법

시뮬레이션 모델에 대한 검증은 차가운 창문 아래에 방열면이 있을 때 창문의 표면온도에 따라 형성되는 하강 기류의 최대 기류 속도 및 온도 분포를 분석한 Heiselberg의 실험¹⁰⁶⁾을 대상으로 수행하였다. Heiselberg의 실험에서는 차가운 창문과 창문 아래에 방열면이 있을 때의 최대 기류속도를 구하고 이를 경험적인 수식을 통해 차가운 표면과의 수평 거리 및 창문 높이와의 온도차(차가운 표면과 실내 설정 온도의 차이)에 따른 최대 기류 속도로 제시하였다. 본 연구에서는 Heiselberg의 실험에서 제시된 최대 기류 속

106) Per Helselberg Op. Cit. pp297-301.

도 및 온도 분포를 시뮬레이션 대상 공간 내의 동일한 위치에서 도출된 최대 기류 속도 및 온도 분포와 비교 분석을 수행하였다. Heiselberg의 실험에서는 차가운 창문과 그 아래의 방열면에 따른 기류 및 온도 분포를 실험하였으므로, 시뮬레이션 모델에서는 복사 난방 패널이 바닥에 적용된 경우를 대상으로 검증을 수행하였으며, 바닥 복사 난방 패널이 적용된 경우의 시뮬레이션 모델에 대한 신뢰성이 있다면, 시뮬레이션 해석에 중요한 외부 조건의 영향 및 그에 따른 창문의 영향을 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열 쾌적성을 평가하기에 적합하게 해석했다고 볼 수 있으며 복사 난방 패널의 다른 방열 조건 및 건물 실내외 환경 요소의 반영 또는 다른 시스템이 적용된 경우에도 시뮬레이션 모델에 신뢰성이 있다고 판단하였다. Heiselberg 실험은 차가운 창문표면과 따뜻한 바닥면의 열교환에 따른 기류속도분포를 분석하는데 많은 참고가 되는 연구로 앞서 고찰했던 Manz, U. Larsson, A. Jurelionis, L. Schellen 등과 같은 논문에서도 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 Heiselberg's 실험 인용하였으며, 최근까지도 차가운 창문의 하강기류와 바닥면의 방열조건에 따른 열교환 효과 및 이에 따른 실내 온열 환경을 분석하거나 시뮬레이션 및 실험을 수행할 때 많이 인용되는 논문이다. 따라서 Heiselberg 실험과의 검증을 통하여 본 시뮬레이션의 정확도와 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 검증 조건

시뮬레이션 모델에 대한 검증은 더 많은 지점에서 비교를 하고, 3차원적인 영향을 반영할 수 있도록 Heiselberg의 실험과 동일한 조건의 시뮬레이션을 구현하기 위해 동일한 크기의 공간에 대해 검증을 수행하는 것이 유리하다. 그러나 Heiselberg의 실험 공간이 본 연구에서 선정된 시뮬레이션 모

텔과 너비와 깊이가 작기 때문에 시뮬레이션 모델의 너비와 깊이를 줄여 실험 조건과 동일한 크기의 모델을 대상으로 검증을 수행하였다. 앞서 도출된 열쾌적성에 영향을 미치는 실내외 환경 요소에 따르면, 실의 크기는 창문의 설계 요소 중에서 높이와 관계가 있으므로 열쾌적성 평가에 중요한 요소가 되지만 Heiselberg의 실험과 시뮬레이션 모델의 높이가 동일하기 때문에 Heiselberg의 실험과 동일한 크기로 조절한 시뮬레이션 모델과 앞서 선정된 시뮬레이션 모델의 외주부에서의 열적 특성은 동일하게 나타난다고 판단할 수 있다. 그리고 너비와 깊이를 조절한 검증 결과는 대상 공간의 높이 및 시뮬레이션 모델과 같이 너비와 깊이를 제외한 모든 요소가 동일하므로 향후 앞선 선정된 시뮬레이션 모델과 동일한 결과를 나타낼 것이라고 판단할 수 있으며, 부하 조건 등을 동일하게 하여 실험과 같은 크기로 시뮬레이션 모델을 조절하는 것이 검증 결과의 정확도를 더 높이는 것이 적절하다.

Heiselberg의 실험에서는 너비 6m, 깊이 7m 그리고 높이 3m의 공간으로 실험체를 구성하였으며, 한쪽 벽 전면에는 차가운 외기온의 영향을 받는 창문을 모사하기 위하여 복사 냉방 패널을 설치하여 방냉하게 하였다. 여기서, 복사 냉방 패널 표면의 평균 온도 편차는 $\pm 5\%$ 내로 유지될 수 있도록 제어하였다. 또한 복사 냉방 패널은 실에서 창문을 통한 열손실을 의미하므로 실에서의 열평형을 이루기 위하여 복사 냉방 패널이 위치하는 벽을 제외한 나머지 벽과 천장은 복사 냉방 패널보다 높은 온도인 25°C 로 유지되는 또다른 공간을 설치하여 실험 대상 공간의 벽체를 통해 열이 공급되도록 하였으며 바닥은 단열상태로 설정하였다. 즉, 복사 냉방 패널의 방냉량과 벽체를 통한 방열량이 동일하도록 하여 실내 온도가 일정하게 유지가 되도록 하였다. 창문을 모사한 복사 냉방 패널은 바닥에 설치된 바닥면과의 열교환으로 인해 온도 구배가 형성되었으며, 이는 복사 난방 패널의 적용 시 시뮬레이

션 모델이 갖추어야 할 창문의 조건을 만족시켰다고 할 수 있다.

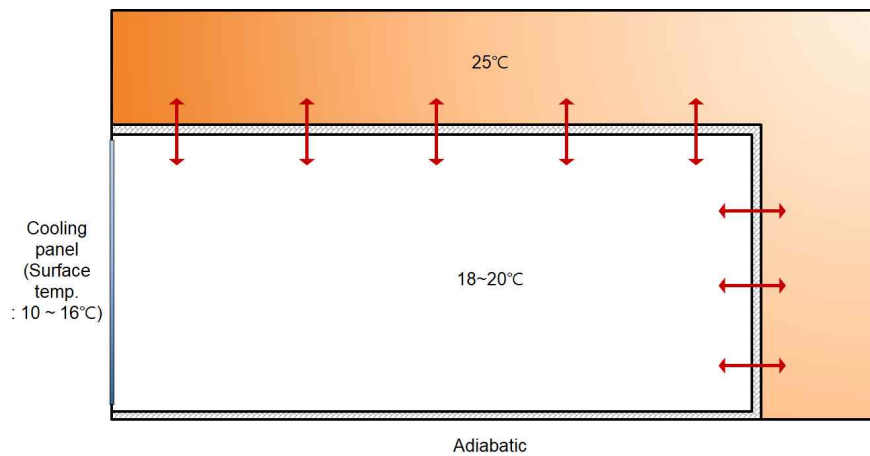
기류 속도는 수직면의 경우 바닥으로부터 0.01-0.5m 높이 사이의 지점에서 측정하였다. 그리고 수평면의 경우 복사 냉방 패널이 위치한 차가운 벽체(창문을 의미함)를 기준으로 0.2m에서 6m 깊이의 지점까지 측정하였으며, 측정 지점 간의 간격은 0.1m로 하였다. 실험 결과 최대 기류 속도는 수직면의 경우 바닥으로부터는 0.03m 이하의 지점에서, 수평면의 경우에는 복사 냉방 패널로부터 0.4m 거리 이내의 지점에서 나타났으며 벽체로부터 2.0m 거리에서는 최대 기류 속도가 25% 정도 감소하였다.

본 연구에서는 앞서 설명하였듯이, Heiselberg의 실험과 동일한 조건의 시뮬레이션을 구현될 수 있도록 동일한 크기의 공간을 대상 공간으로 설정하였다. 그러나 Heiselberg의 실험에서는 창문을 반영하기 위해 일정한 온도로 유지되는 복사 냉방 패널을 적용하였지만 본 연구에서는 외주부 시스템 및 복사 난방이 적용된 경우를 평가할 때 창문의 표면에 방사되는 복사열 및 대류열이 전달되어 창문 표면온도에 미치는 변화를 반영하기 위해 창문을 중공층이 포함된 두께가 있는 솔리드로 설정하였으며, 앞서 선정된 시뮬레이션 모델에 따라 외부 공간과 창문과의 열교환 효과를 통해 외부의 영향을 반영하였다. 그리고 창문의 열관류율 조건은 Heiselberg의 실험에서 방 냉하는 복사 냉방 패널로 인해 손실되는 열량과 동일한 열량이 시뮬레이션에서 창문을 통해 손실되는 조건으로 설정하였다. 또한 실험에서는 창문을 통해 손실되는 열량을 공급하기 위해 나머지 벽체와 천장을 통한 열전달이 이루어졌는데, 시뮬레이션에서는 벽체 및 천장의 경계 조건을 온도 조건으로 설정하여 실험 조건과 동일한 열량이 열교환되도록 하였다.

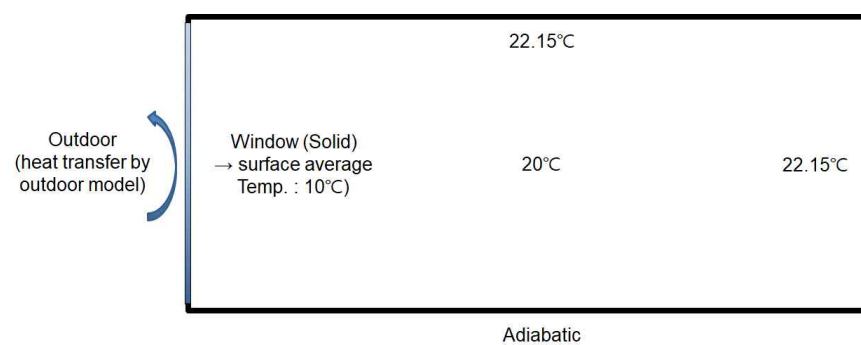
이와 같은 Heiselberg의 실험 조건과 본 연구에서의 시뮬레이션 구현 조건은 <Table 3.14> 및 [Figure 3.10], [Figure 3.11]과 같다.

**<Table 3.14> Simulation implementation condition
in the Heiselberg' s experiment and this study**

Classification	Heiselberg' s Experiment	This study' s simulation
Indoor area	6 (m) × 7 (m) × 3 (m) (w × d × h)	6 (m) × 7 (m) × 3 (m) (w × d × h)
Window surface temperature	10~16℃	10~12℃ (window inner surface temperature : 10℃)
Room temperature	18~20℃	18~20℃



[Figure 3.10] Description of Heiselberg' s Experiment



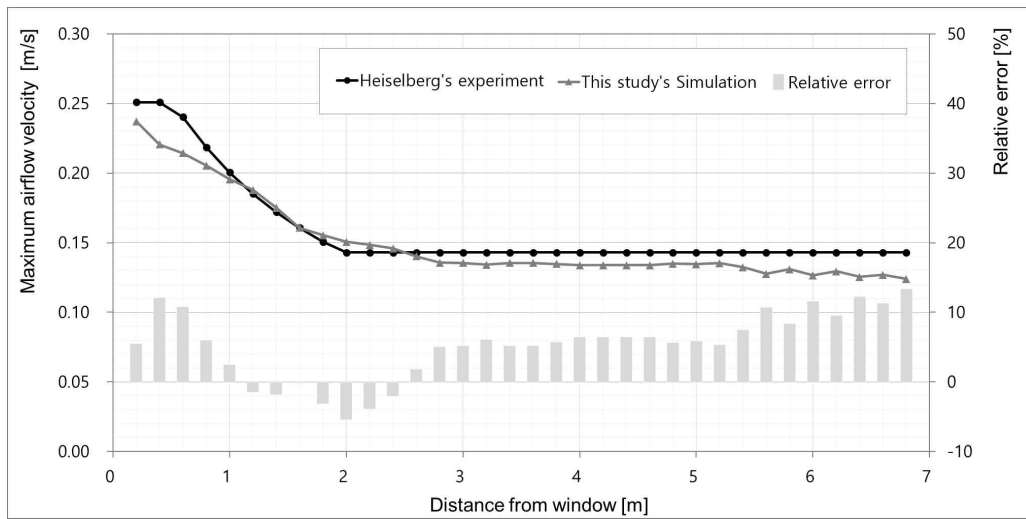
[Figure 3.11] Description of this study' s simulation

(3) 검증 결과

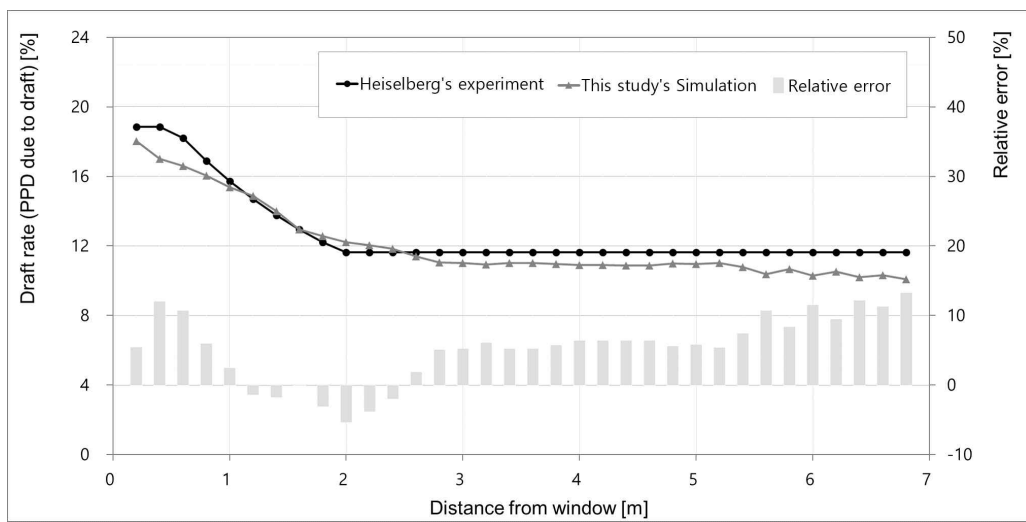
시뮬레이션 검증은 Heiselberg의 실험과 시뮬레이션의 결과 중 기류속도를 비교 분석하였으며, 또한 실험에서의 온도 조건과 시뮬레이션에서의 온도 조건을 활용하여 draft rate을 계산한 후에 이에 대한 비교 분석도 수행하였다. 이와 같은 시뮬레이션의 검증 결과는 [Figure 3.12] 및 [Figure 3.13]과 같다.

[Figure 3.12]에 나타난 기류속도의 검증 결과를 보면 Relative error값은 최소 0.01%에서 최대 13.32%까지 나타났으며, 평균오차는 6.36%, 표준편차는 3.42%를 나타내었다. 그리고 [Figure 3.13]의 draft rate을 비교평가한 결과를 보면 마찬가지로 최소 0.01%에서 최대 13.33%까지 나타났으며, 평균 오차는 6.05%, 표준편차 3.32%을 나타내었다. 기류속도와 draft rate의 relative error가 창문으로부터 멀어질수록 커지는데, 이는 Helselberg의 실험에서 창문으로부터 2m 지점부터는 고정된 값으로 판단하기 때문에 나타난 오차로 판단된다. 또한 창문에 가까운 지점에서도 오차가 높는데, 이는 Helselberg의 실험과 본 시뮬레이션에서의 창문온도 분포의 차이로 인한 오차로 판단된다. 따라서 시뮬레이션 검증 결과에 따르면, 본 시뮬레이션모델은 기류속도와 draft rate의 전체오차를 포함하였을 때, 평균 6.20%, 표준편차 3.35%의 신뢰성을 가진다고 할 수 있다.

Helselberg의 실험과 시뮬레이션 결과의 오차가 기류 속도의 경우에는 최대 0.03m/s, draft rate의 경우에는 4%까지 나타났지만, 기류 속도와 draft rate의 경향성을 비교하였을 경우에는 기존 실험 결과와 유사한 흐름을 나타내며, 쾌적성을 판단하는 중요한 지점인 재실영역에서는 relative error값이 상대적으로 낮아지므로 본 시뮬레이션 모델은 타당한 것으로 판단할 수 있다.



[Figure 3.12] Results of maximum airflow velocity comparison



[Figure 3.13] Results of draft rate comparison

3.3 소결

본 장에서는 열쾌적성 관점에서 복사 난방 패널의 외주부 적용성을 평가하기 위한 시뮬레이션 모델을 구축하는 단계로서 본 연구에서의 평가 결과가 일반적인 데이터로 활용될 수 있도록 표준이라 할 수 있는 시뮬레이션 평가 대상 공간을 선정하였다. 그리고 각 요소별 시뮬레이션에서의 모델링 방법을 선행 연구 결과를 바탕으로 분석한 후에, 요소별 모델링 방법의 영향도에 따라 열쾌적성 평가에 적합한 모델링 방법을 선정하였으며, 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 구축된 시뮬레이션 모델은 실험을 통하여 차가운 창문과 따뜻한 방열면의 영향에 따른 실내 온열 환경 분포를 분석한 기존 연구 결과와 검증을 수행하여 시뮬레이션 모델의 신뢰도를 높이하고자 하였다.

- 1) 열쾌적성 평가에 대한 결과가 일반적으로 적용 가능한 데이터로서 활용될 수 있도록 대상 공간의 설정 값들이 근거 있게 제시되어야 한다. 따라서 건물의 내외주부 구분이 뚜렷하고 이에 따른 시스템이 적용되는 오피스 빌딩을 대상으로 Prototype이라 할 수 있는 공간을 선정하였다. 이를 위해 오피스 빌딩 공간 계획의 Principle을 선정하고, 시뮬레이션 대상 공간의 범위를 설정하였으며, 그 결과 너비 8.1m, 깊이 9m, 높이 3m의 재실밀도 0.2인/m²인 오피스 빌딩의 평면을 Prototype으로 선정하였다. 그리고 건물 환경 요소에 따른 온도 및 기류 해석을 정밀하게 해석하고, 복사 열전달 해석을 통한 재실자의 열쾌적성 평가가 가능하도록 CFD 시뮬레이션을 활용하여 연구를 수행하였다.

- 2) 건물의 실내 환경 요소 중 internal heat gain의 영향을 시뮬레이션에서 평가하기 위해서는 인체, 조명, 기기를 모델링해야 하며, 이와 같은 모델링 방법은 평가하고자 하는 대상에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 내부 발열체에서 발생하는 열은 자연 대류의 기류 흐름이기 때문에 복사 난방 패널의 자연 대류 흐름에 영향을 줄 수 있으므로, 내부발열에 의해 나타나는 따뜻한 공기의 흐름에 대한 반영이 필요하다. 따라서 시뮬레이션 대상 모델에서는 internal heat gain에 의한 따뜻한 공기의 흐름을 반영할 수 있도록 내부 발열체를 통합하지 않고 배치범위를 다수로 하여 internal heat gain을 모델링하였으며, 비발열체의 모사 여부에 대해서는 모사한 경우와 하지 않은 경우 두 가지를 모두 고려하여 내부 발열에 의해 가열된 공기의 흐름 및 내부에 파티션이 있는 경우에 대한 반영을 동시에 반영하였다. Infiltration의 경우에는 창문에 작은 틈새를 모델링하고 환기 횡수법을 활용하여 시뮬레이션에서 모델링된 infiltration의 velocity inlet 조건을 설정하였다. 그리고 복사 패널은 패널이 외주부에 적용되는 경우에는 천장이나 바닥 또는 천장과 바닥에 동시에 적용될 수 있도록 하였으나, 내주부에 적용되는 복사 난방 패널의 경우에는 내주부의 천장에만 적용될 수 있도록 모델링하였다.
- 3) 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가는 외부 환경 조건의 영향으로 인한 실내의 온열환경 변화와 실내 환경 요소의 영향, 그리고 난방 부하의 제거 및 열쾌적성 확보를 위한 복사 난방 패널의 방열량을 고려해야 하므로 이를 반영할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 복사 난방 패널이 외주부에 적용되었을 경우에는 열쾌적성에 영향을 주는 대상에 따라 각각 다른 공간 모델이 적용이 되므로, 복사 난방 패널과 차가운

창문과의 관계성을 분석하고, 건물의 실내외 환경 요소의 영향이 있을 때 복사 난방 패널의 적정 방열 조건을 설정할 수 있도록 시뮬레이션 모델을 단계적 평가가 가능하도록 제시하였다. 그리고 하강기류로 인한 창문 표면의 수직면 온도 편차 및 복사열교환으로 인한 창문의 온도상승효과를 고려할 수 있도록 외부 환경과 창문과의 열교환이 반영된 난방 부하 모사 조건을 설정하였으며, 열쾌적성 평가에 적합한 계산 모델을 선택하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

- 4) 구축된 시뮬레이션 모델의 계산 결과가 기존 실험의 측정치와 유사하게 나타났으므로 시뮬레이션 모델은 실제 외주부에서의 온열 환경을 적절하게 모사하고 있다고 판단할 수 있으며, 외부주에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하기에 적합한 시뮬레이션 모델이라 할 수 있다. 따라서 본 장에서 구축한 시뮬레이션 모델을 활용하여 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 열쾌적성 평가를 수행하고 평가 결과를 바탕으로 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하고자 한다.

제 4 장 시뮬레이션을 통한 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가

4.1 외부 환경 조건 및 복사 난방 패널의 방열 범위 설정

4.2 시뮬레이션 케이스

4.3 시뮬레이션 결과

4.4 소결

건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가는 열쾌적성에 영향을 주는 건물의 실내외 환경 조건에서 복사 난방 패널의 부하 제거를 위한 방열량만으로 열쾌적성을 향상시켰다고 판단할 수 있는 기준에 따라 수행되어야 한다. 이를 위하여 앞서 열쾌적성을 판단할 수 있는 기준을 정립하고 건물의 실내외 환경 조건 및 이에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 따라서 본 장에서는 건물의 실내외 환경 조건에 따라 외주부에 설치된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 수행하였다. 복사 난방 패널은 외부 환경 조건에 따라 적용 방법이 달라지므로 열쾌적성 평가 결과가 일반화된 데이터로서의 가치를 지닐 수 있도록 외부 환경 조건을 일반화하였으며, 국내외 복사 난방 패널의 기준 및 관련 연구를 조사하여 적용 가능한 방열 범위를 설정하였다. 그리고 건물의 실내외 환경요소를 고려한 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션 케이스를 선정하여 시뮬레이션을 수행하고, downdraft 및 복사불쾌적의 발생여부를 분석하였다. 또한 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 결과 중 외주부에 적용 가능한 케이스를 선정하여 기존 외주부에 적용되어온 대류 난방과 열쾌적성 측면에서 비교 평가하였다.

4.1 외부 환경 조건 및 복사 난방 패널의 방열 범위 설정

복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 결과는 외기온이나 창문의 단열성과 같은 외부 환경 조건과 그에 따른 복사 난방 패널의 방열량이 일반적으로 적용 가능한 데이터로 제시가 되어야 한다. 이를 위하여 본 절에서는 우선 복사 난방 패널의 방열량을 결정하는 외부 환경 조건을 일반화하여 평가 결과를 보편적으로 적용할 수 있도록 하였다. 그리고 복사 난방 패널을 외주부에 적용할 경우에는 상대적으로 좁은 면적에 부분적으로 적용하기 되는데, 이때 부하 제거를 위한 방열량을 확보하기 위해서는 단위 면적당 방열량을 크게 산정해야 하므로 표면온도가 높아지게 되고 이는 복사불쾌적과 같은 재실자의 불쾌적을 유발할 수 있다. 따라서 일반화된 외부 환경 조건에 따라 복사 난방 패널의 필요 방열량을 산정하고, 산정된 방열량이 적용될 때 패널의 표면온도가 복사불쾌적을 발생시키지 않는 범위 내에 있는지 판단할 수 있도록 외주부 적용 시의 방열 범위를 설정하고자 하였다.

4.1.1 외부 환경 조건의 일반화

외부 환경 조건이란 외기온과 같은 외부의 영향을 받아 외피(창문)측으로 손실 또는 획득되는 열량을 의미하며, 일반적으로 이러한 외부 환경의 조건은 건물의 부하를 의미한다. 본 연구에서는 겨울철 즉, 난방기를 대상으로 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하므로 외부 환경 조건은 난방기 때의 조건인 외부로의 열손실만 있는 것으로 가정할 수 있으며 이에 따른 난방 부하를 외부 환경 조건이라 할 수 있다.

복사 난방 패널이 외주부에 적용되는 경우, 패널이 담당해야 하는 난방

부하는 식 (4.1)과 같이 창문을 통한 열손실, 벽체를 통한 열손실 그리고 침기를 통한 열손실이 있다. 창문을 통한 열손실과 벽체를 통한 열손실은 각각 식 (4.2) 및 (4.3)과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{heatingload} = Q_{wall} + Q_{window} + Q_{infil} \quad (4.1)$$

$Q_{heatingload}$: Heating load [W]
 Q_{wall} : Heat loss through a wall [W]
 Q_{window} : Heat loss through a window [W]
 Q_{infil} : Heat loss by infiltration [W]

$$Q_{wall} = U_{wall} \cdot A_{wall} \cdot (t_o - t_i) \quad (4.2)$$

U_{wall} : U-value of outdoor wall [W/m²°C]
 A_{wall} : Wall area [m²]
 t_o : Outdoor air dry-bulb temperature [°C]
 t_{room} : Indoor air dry-bulb temperature [°C]

$$Q_{glaz} = U_{glaz} \cdot A_{glaz} \cdot (t_o - t_i) \quad (4.3)$$

U_{glaz} : U-value of window[W/m²°C]
 A_{glaz} : window area [m²]

창문을 통한 열손실 계산 시에, 창문의 프레임에 대한 영향은 창문의 열관류율에 포함되어 있으므로 이에 대한 고려는 하지 않았다. 침기를 통한 열손실은 식 (4.4)와 같이 계산할 수 있다. 여기서 식 (4.4)에서 제시된 침기율은 단위 시간당(초당)의 공기 풍량이므로 앞서 침기율 산정을 위해서 선

정된 환기 횡수법에 따른 velocity inlet의 계산을 위해서 식 (4.5)와 같이 환기 횡수(ACH)를 단위 시간당 공기 풍량(m^3/s)으로 변환하였다.

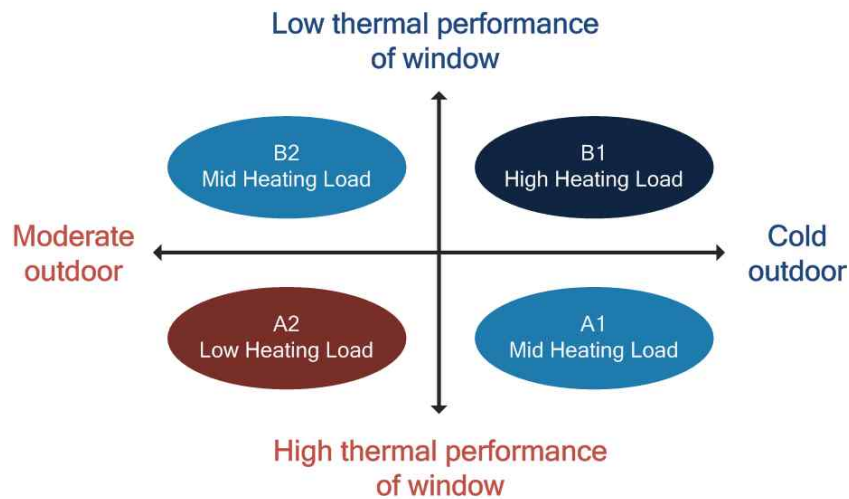
$$Q_{infil} = \rho_{air} \cdot C_{air} \cdot \dot{V}_{infil}(t_o - t_i) \quad (4.4)$$

ρ_{air} : Air density [kg/m^3]
 C_{air} : Specific heat of air [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]
 \dot{V}_{infil} : Infiltration rate [m^3/s]

$$\dot{V}_{infil} = ACH \times V_{room} \times \frac{1}{3600} \quad (4.5)$$

ACH : Number of ventilation [number/h]
 V_{room} : room volume [m^3]

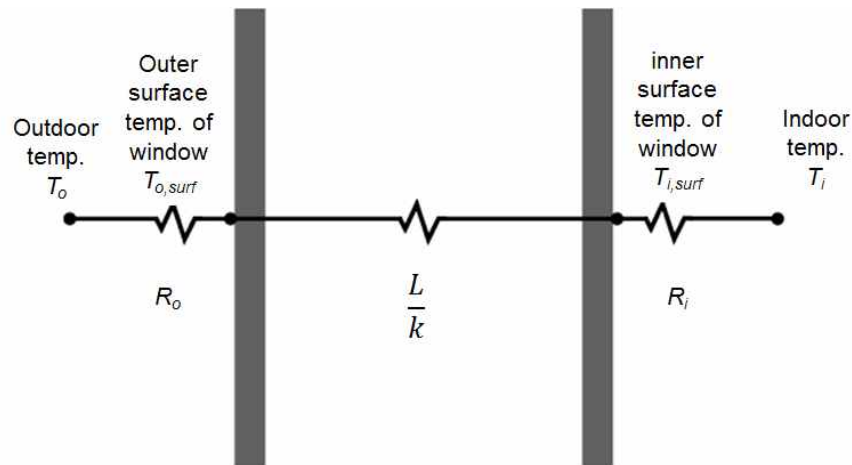
건물의 난방 부하 제거를 위해 산정된 복사 난방 패널의 방열량은 대상 공간 모델과 마찬가지로 일반적인 데이터로서의 가치를 지닐 수 있도록 산정된 방열량이 보편적으로 적용될 수 있도록 해야 한다. 즉, 복사 난방 패널이 건물 외주부에 적용되는 경우 난방 부하를 형성하는 외부 환경은 다양하게 나타날 수 있으므로 본 연구에서의 CFD 시뮬레이션 Case에 해당되지 않는 조건에서의 열쾌적성 평가 결과와 그때 복사 난방 패널의 방열 조건을 외부 환경 조건에 대한 일반화 과정을 통하여 예측할 수 있어야 한다. 건물에서의 난방 부하는 도출된 수식의 계산 요소를 통하여 알 수 있듯이 외부 온도와 열관류율, 외피의 면적이 중요하게 작용하는데, 면적은 창면적비를 의미하는 것으로 앞서 100%를 기준으로 설정하였기 때문에 결국 외부 환경이 외기온과 창문의 열관류율에 따라 어떻게 변화하는지 판단해야 한다.



[Figure 4.1] Classification of heating load

외기온과 창문의 열관류율에 따라 외부환경은 [Figure 4.1]과 같이 구분할 수 있으며, 이러한 외기온과 창문의 열관류율에 따른 외부 환경은 결국 창문의 내측면 표면온도에 영향을 미치게 되어, 창문의 내측면 표면 온도에 따라 차가운 공기 및 하강 기류가 형성된다. 따라서 외부 환경 조건이 실내에 미치는 영향을 대표하는 것은 창문의 실내측 표면 온도라 할 수 있으므로, 외부 환경 조건의 변화 양상에 대해 창문의 실내측 표면 온도를 기준으로 범위를 설정하고 각 범위에 해당하는 외부 환경 조건을 향후 시뮬레이션 case에서 외부 환경을 모델링하는데 필요한 입력값을 설정하도록 한다.

창문의 내표면 온도는 [Figure 4.2]와 같이 외부 환경에서 창문으로 통해 실내로 전달되는 열저항 계산 방법을 활용하여 창문의 내표면 대표 온도를 구할 수 있다. [Figure 4.2]의 해당 구간 온도차는 식 (4.6)과 같이 총합 열저항에서 해당 열저항이 차지하는 비율에 비례하여 계산할 수 있으며, 이때의 총합 열저항은 식 (4.7)과 같이 계산하는데, 일반적으로 창문 제조사에서 제시하는 열관류율값은 총합 열저항의 역수이다.



[Figure 4.2] Thermal resistance of window

$$\Delta t = (t_o - t_i) \times \frac{R_x}{R_T} \quad (4.6)$$

Δt : temperature difference of section R_o or R_i [°C]
 R_x : thermal resistance of specific section [$\text{m}^2\text{°C/W}$]
 R_T : Total thermal resistance [$\text{m}^2\text{°C/W}$]

$$R_T = R_{conv,o} + R_{cond} + R_{conv,i} \quad (4.7)$$

$R_{conv,o}$: Convective thermal resistance of outdoor [$\text{m}^2\text{°C/W}$]
 R_{cond} : Conductive thermal resistance of window [$\text{m}^2\text{°C/W}$]
 $R_{conv,i}$: Convective thermal resistance of indoor [$\text{m}^2\text{°C/W}$]

즉, 일반적으로 제시되는 창문의 열관류율값은 ASHRAE¹⁰⁷⁾의 겨울철 난방기 기준의 외부와 실내 측의 표면대류열저항값을 적용($R_{conv,o}=0.029\text{m}^2\text{°C}$

107) ASHRAE Handbook Fundamentals, Op. cit., 2013

/W, $R_{conv,i}=0.147\text{m}^2\text{C}/\text{W}$)하여 총합열저항값의 역수로 제시하므로 이를 고려하여 창문의 실내외측 표면온도 계산을 하도록 한다.

이와 같은 수식을 정리하면, 외부 온도와 실외 표면의 대류열저항값으로 식 (4.8)과 같이 창문의 실외 측 표면 온도를 계산할 수 있으며, 계산된 창문 실외 측 표면 온도를 통해서 식 (4.9)와 같이 창문의 실내 측 표면 온도를 계산할 수 있다.

$$t_{o,sur} - t_o = (t_i - t_o) \times \frac{R_{conv,o}}{R_T} \quad (4.8)$$

$$t_{i,sur} - t_{o,sur} = (t_i - t_o) \times \frac{R_{cond}}{R_T} \quad (4.9)$$

$t_{o,sur}$: Outside surface temperature of window [°C]
 $t_{i,sur}$: inside surface temperature of window [°C]

도출된 수식을 바탕으로 분석한 결과, <Table 4.1>과 같이 창문의 실내 측 표면 온도가 0.5°C씩 감소할 때의 창문 열관류율에 따른 외기온의 변화를 살펴보면, 열관류율에 따라 일정하게 줄어드는 결과를 확인할 수 있다. 이러한 차이를 회귀 분석하여 일반화시키면 식 (4.10)을 도출할 수 있으며, 이 식을 통해 창문의 열관류율에 따른 외기온의 차이를 구할 수 있다.

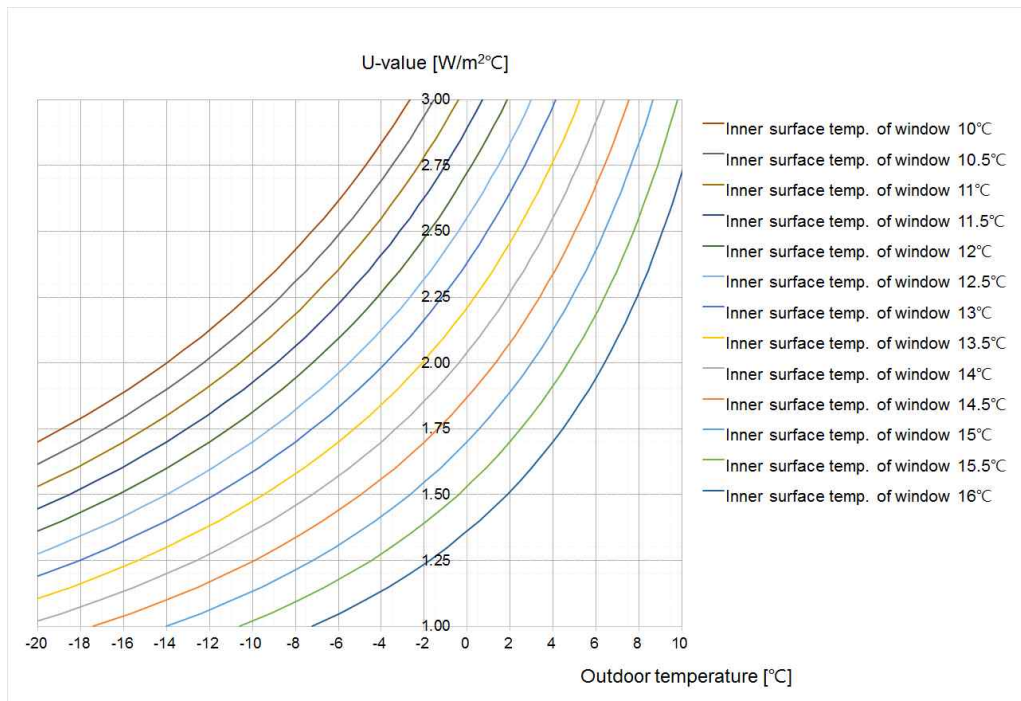
$$\Delta t_o = -0.0356 U_{glaz}^2 + 0.0934 U_{glaz} - 1.16 \quad (4.10)$$

따라서 창문의 열관류율 및 외기온 그리고 창문의 실내측 표면온도 중 2

가지 데이터만 확인할 수 있으면 <Table 4.1>과 [Figure 4.3]을 통해서 나머지 값을 도출할 수 있으며 이때 제시되는 세 가지 결과값은 다음 절의 복사 난방 패널의 방열 범위를 설정할 때 활용할 수 있다. 즉, 본 절에서 제시된 외부 환경 조건의 결과값은 향후 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 결과 및 그에 따른 방열 조건을 설정하기 위해 도출된 예측식에 활용되어서 본 연구에서 시뮬레이션을 수행하기 않은 외부 환경 조건에서의 결과값을 확인할 수 있도록 하였다.

<Table 4.1> Change of inner surface temperature of window

$t_o \backslash U_{glaz}$	3.00	2.75	2.50	2.25	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00
-20	2.36	3.86	5.30	6.77	8.24	9.71	11.18	12.65	14.12
-18	3.24	4.64	6.03	7.43	8.83	10.22	11.62	13.02	14.41
-16	4.12	5.48	6.77	8.09	9.41	10.74	12.06	13.38	14.71
-14	5.01	6.25	7.50	8.75	10.00	11.25	12.50	13.75	15.00
-12	5.89	7.06	8.24	9.41	10.59	11.76	12.94	14.12	15.29
-10	6.77	7.87	8.89	10.08	11.18	12.28	13.38	14.49	15.59
-8	7.65	8.68	9.71	10.74	11.77	12.80	13.82	14.85	15.88
-6	8.53	9.49	10.44	11.40	12.35	13.31	14.27	15.22	16.18
-4	9.46	10.30	11.18	12.06	12.94	13.82	14.70	15.59	16.47
-2	10.30	11.11	11.91	12.72	13.53	14.34	15.15	15.96	16.76
0	11.18	11.91	12.65	13.38	14.12	14.95	15.59	16.32	17.06
2	12.06	12.72	13.38	14.04	14.70	15.37	16.03	16.69	17.35
4	12.94	13.53	14.12	14.71	15.29	15.88	16.47	17.06	17.64
6	13.82	14.34	14.85	15.37	15.88	16.40	16.91	17.43	17.94
8	14.71	15.15	15.59	16.03	16.47	16.91	17.35	17.79	18.23
10	15.59	15.96	16.32	16.69	17.06	17.43	17.79	18.16	18.53
Predicted equation	$\Delta t_o = -0.0356 U_{glaz}^2 + 0.0934 U_{glaz} - 1.16 \quad (R^2 = 0.9923)$								



[Figure 4.3] Inner surface temperature of window
by u-value and outdoor temperature

이와 같은 외부 환경 조건을 바탕으로 본 연구에서 시뮬레이션의 케이스 선정 시 적용할 외기온과 열관류율을 선정하였다. 외기온의 경우 쿠파의 기후 조건 구분¹⁰⁸⁾ 중에서 극한 기후 (너무 춥거나 너무 더운 기후 조건)를 제외하고 Type C에 해당되는 온대 기후(Moist Subtropical Mid-Latitude Climate)와 Type D에 해당되는 냉대 기후(Moist Continental Mid-Latitude Climate)를 갖는 대표적인 지역의 최대 난방 부하 계산 시의 외기온과 겨울철의 평균 외기온을 선정하였다. 그리고 창문의 열관류율은 국내를 기준으로 하여 최근 3년간 신축되거나 리모델링된 건물에서 가장 많이 적용되는

108) 이승호, 기후학, 푸른길, 2007

로이유리의 열관류율 및 건물의 단열성을 위해 권장되는 창문의 열관류율값을 선정하였다. 이와 같이 선정된 결과에 따른 창문의 실내 측 표면 온도의 결과는 <Table 4.2> 와 같다. 도출된 결과를 보면 외기온의 낮을수록 창문의 단열성이 향상된 경우, 창문 실내 측 표면 온도의 상승비율이 높게 나타났다. 이는 혹독한 실외 환경일수록 창문의 단열성이 조금만 높아져도 열쾌적성을 향상시킬 가능성이 높다고 판단할 수 있다. 이러한 결과로 볼 때, 외주부에서 불쾌적의 발생가능성이 높은 상황을 외기온이 낮은 조건으로 판단하여 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하면, 평가한 조건보다 외기온이 같고 창문의 단열성이 향상된 경우에는 이 결과보다 재실자의 쾌적성이 우수하다고 가정할 수 있다. 따라서 시뮬레이션 케이스 선정 시에 외부 환경 조건 중, 창문의 열관류율은 $1.75\text{W/m}^2\text{°C}$ 로 고정하고 외기온을 조작변수로 하여 시뮬레이션을 수행하도록 하였다. 향후 예측식을 통해본 시뮬레이션 케이스에 해당되지 않은 외기온과 창문 열관류율에서의 열쾌적성 평가를 확인할 수 있도록 하였다. 또한 시뮬레이션 케이스로 선정된 외부 환경 조건의 의미를 명확하게 할 수 있도록, Index로도 표현하였다.

<Table 4.2> Inner surface temperature of window by outdoor conditions

t_o [°C] \ U_{glaz} [$\text{W/m}^2\text{°C}$]	1.75	1.15	Index
-16.7	10.559°C	13.796°C	Tisw 10.5
-11.3	11.968°C	14.709°C	Tisw 12.0
-5.9	13.477°C	15.622°C	Tisw 13.5
-0.2	14.926°C	16.585°C	Tisw 15.0

Tisw : Representative value of inner surface temperature of window

4.1.2 복사 난방 패널의 방열량

건물 외주부에 적용되는 복사 난방 패널의 방열량은 난방 부하를 처리할 수 있는 열을 공급할 수 있도록 설정해야 한다. 이를 위해 본 절에서는 복사 난방 패널의 방열량 설정 방법에 대해 고찰하였다.

복사 난방 패널은 천장 복사 난방 패널 또는 바닥 복사 난방 패널이 적용되어 실에서 발생된 난방부하를 전부 담당하는 것으로 가정하였으며, 또한 난방 부하 계산 시 infiltration의 부하도 반영하여 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하였다. 이를 위해 시뮬레이션 모델 중 parameter 2에 해당되는 infiltration 해석이 가능한 시뮬레이션 모델을 기본 모델로 선정하여 평가하였으며, 침기량은 사무소 건물에서 일반적으로 적용되는 0.5회/h로 선정하였다. 그리고 복사 난방 패널의 방열 조건은 방열면적 및 이에 따른 표면온도를 조작 변수로 선정하여 패널이 천장면 또는 바닥면 일부에 적용되는 경우와 면 전체에 적용되는 경우를 고려해야 평가하였다. 건물 외주부에서의 열적 불쾌적의 발생가능성이 높은 상황을 가정하기 위해 일사의 영향은 고려하지 않았다.

복사 난방 패널의 방열량은 앞서 2.2.1절에서 설명하였듯이 식 (4.11), (4.12)에 제시된 것처럼 복사 난방 패널의 방열면적과 단위면적당 공급열량과의 관계로 표현할 수 있다. 따라서 건물의 난방 부하 제거를 위한 복사 난방 패널의 필요 열량 즉 방열량은 복사 난방 패널의 표면 온도로 표현할 수 있으며, 복사 난방 패널의 표면 온도는 앞서 2.2절에서 복사 난방 패널의 방열 특성을 분석한 결과에 따르면 AHSRAE와 EN에 제시하고 있는데, 패널의 방열량은 표면온도로 산정하여 평가하는 경우에는 EN의 수식이 표면온도의 계산에 유리하므로 식 (4.13)과 (4.14)를 활용하여 계산하였다.

$$(q_r \times A_r) + (q_w \times A_w) = 0 \quad (4.11)$$

$$(q_r \times W_r \times L_r) + K_w \times A_w \times (t_i - t_o) = 0 \quad (4.12)$$

$$q_p = 6(t_{rsurf} - t_i) \quad \text{Radiant Ceiling Heating Panel} \quad (4.13)$$

$$q_p = 8.92(t_{rsurf} - t_i)^{1.1} \quad \text{Radiant floor Heating Panel} \quad (4.14)$$

- q_r : the heat flow density (heat flux) at the surface of radiant floor heating system [W/m²]
- q_w : the heat loss through window per unit area [W/m²]
- A_r : the heating surface area of radiant floor heating system [m²]
- A_w : the window surface area [m²]
- W_r : the width of the radiant floor heating system [m]
- L_r : the length of the radiant floor heating system [m]
- K_w : the heat transmission coefficient (U-value) of window [W/m²]
- q_p : the heat flow density of radiant floor heating system [W/m²]
- t_{rsurf} : the average surface temperature of radiant floor heating system [°C]

4.1.3 적용 가능한 복사 난방 패널의 방열 범위 설정

복사 난방 패널을 외주부에 적용하여 건물의 난방 부하 전체를 담당하게 되면, 앞서 도출된 결과와 같이 필요 방열량이 높아져서 외주부에 적용되는 방열면적을 넓게 하거나 패널의 표면온도를 높여서 필요 방열량을 공급해주어야 한다. 여기서 복사 난방 패널의 방열량에 따른 방열면적과 표면온도의 관계를 살펴보면, 필요 방열량이 높을 경우에 패널의 방열면적을 넓게 하면 표면온도는 상대적으로 낮출 수 있지만, 패널의 방열면적을 좁게 하면 표면온도를 높여서 난방 부하 제거를 위한 열량을 공급해야 한다. 그러나 복사 난방 패널을 외주부에 적용하는 개념이기 때문에 패널의 방열면적을 외주부

로 설계된 범위 이상으로는 방열면적을 넓게 할 수 없으므로 패널의 표면온도를 허용 가능한 수준까지 높여서 필요 방열량을 맞추어야 한다. 이에 본 절에서는 복사 난방 패널의 허용 가능한 표면 온도를 산정하여 패널의 방열 범위를 설정하고자 한다.

일반적으로 복사 난방 패널의 허용 가능한 표면 온도 및 최대 방열량은 EN과 ASHRAE에서 제시된 결과를 따르고 있으면, 그 기준은 <Table 4.3>과 같다. 천장 복사 난방의 경우에는 복사불쾌적의 가능성이 높기 때문에 다른 적용면에 비해 상대적으로 낮은 27℃를 허용 가능한 최대 온도로 제시하고 있으며, 바닥 복사 난방의 경우에는 재실영역과 비재실영역으로 구분하여 재실영역은 29℃, 비재실영역은 35℃로 제시하고 있다. 또한 이와 같은 허용 가능한 최대 온도 외에 앞선 2.1.3절에서 제시된 바와 같이 허용 가능한 복사온도차를 제시하고 있으며, <Table 4.4>와 같이 Class에 따라 각각 다른 수준의 기준이 제시되었는데, 최대 온도와 마찬가지로 복사불쾌적의 위험이 높은 천장 복사 난방의 경우, 허용 가능한 온도 범위가 가장 작다.

EN에서 제시된 기준을 난방 부하 조건에 따른 패널의 필요 방열량 산정 결과와 비교하였을 때, 제시된 기준에 따른 방열량은 복사 난방 패널이 외주부에 적용되었을 경우에는 부하를 담당하기에 부족할 수 있다.

<Table 4.3> Acceptable thermal output conditions

Classification	Acceptable surface temperature [℃]	Maximum heat capacity [W/m ²]
Ceiling	27 (17)	42
Floor occupied zone	29 (19)	99
Floor non-occupied zone	35 (19)	165
Wall	40 (17)	160

()안은 minimum값

〈Table 4.4〉 Radiant temperature asymmetry

Category	Warm ceiling	cool wall	Cool ceiling	Warm wall
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

이러한 경우에는 방열 면적을 넓혀서 적용을 해야 하는데 앞서 설명하였듯이, 외주부의 방열 면적을 높이는 데는 한계가 있으므로 패널의 표면 온도를 높여서 적용할 수 있는 방법이 필요하다.

EN에서 제시된 복사 난방 패널의 허용 가능한 표면 온도 및 방열량은 Heat-balance approach를 활용한 열쾌적성의 관점에서 산정된 결과로, adaptive approach의 관점에서는 EN에서 제시된 기준보다 더 넓은 범위의 한계 온도를 설정할 수 있다. 따라서 천장 및 바닥면의 표면 온도에 따른 열쾌적성을 분석한 다양한 선행연구를 바탕으로 허용 가능한 온도 범위 및 이에 따른 방열량을 범위를 고찰하였다.

천장 복사 난방의 허용 가능 표면온도의 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. McNall¹⁰⁹⁾는 4 x 8m 크기의 천장복사패널 아래에 앉은 상태의 남녀 대학생들을 대상으로 실험을 수행하였는데, Hot ceiling의 표면 온도 54.4°C, Air temperature 26°C에서 16명의 대상자 중 79%가 ‘no noticeable discomfort’ 느꼈으며, chamber test상에서 hot ceiling의 온도에 따라 radiant temperature asymmetry를 chamber 가운데서 계산하였을 때 7.5°C 도출하였다. Griffiths¹¹⁰⁾는 천장면의 허용 가능한 표면 온도 범위를 도출하기 위하

109) P. E. McNall et al. Thermal and Comforts Sensations of Sedentary Persons Exposed to Asymmetric Radiant Fields, ASHRAE Transactions , 1970

110) D. A. Griffith et al. Sensitivity to Temporal Variation in Thermal Conditions, Ergonomics, 1974

여 실내의 중심에 앉은 24명의 대상자들을 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 결과 천장의 온도가 45°C이고 모든 벽체 및 바닥의 온도가 20°C일 때 7.3°C의 radiant asymmetry 형성되었는데, 이는 모든 대상자들에게 허용 가능한 범위로 판단하였다.

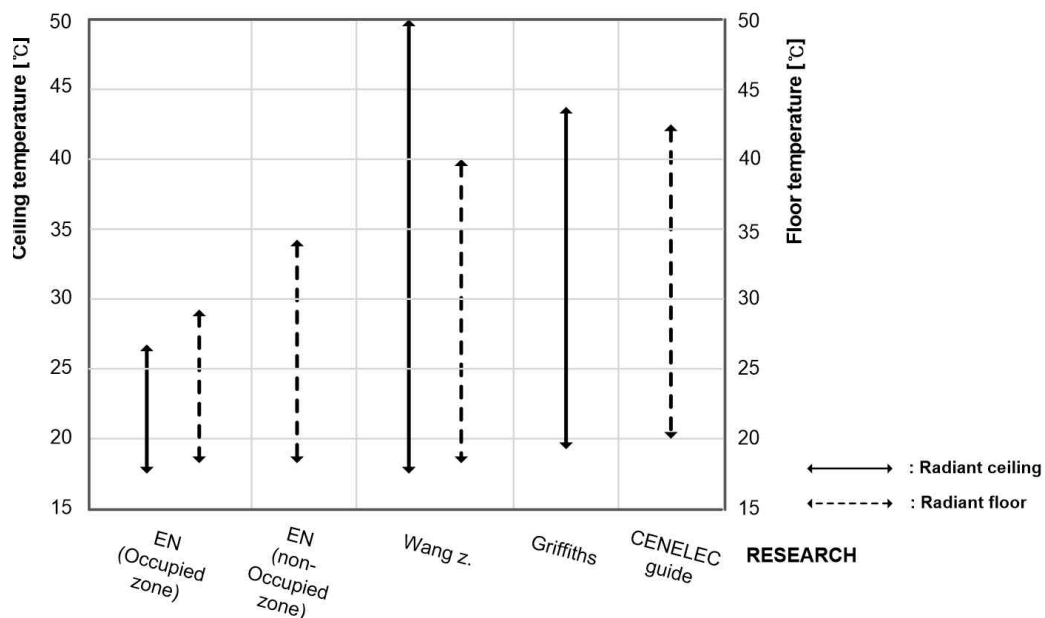
Wang Z¹¹¹⁾는 Maximum ceiling temperature로 50°C 설정하였으며, Air temperature의 범위 (17-27°C)내에서 radiant ceiling으로 재실자에게 쾌적함을 제공하는 것이 가능하며 이 이상의 온도 범위에서는 천장복사로도 쾌적함을 줄 수 없다고 제시하였다. 또한 1°C씩 Air temperature가 증가함에 따라 3-5°C의 허용 가능한 천장 온도 감소함을 그래프를 통하여 제시하였다. 또한 이 연구에서는 바닥 복사 난방의 허용 가능 온도에 대해서도 제시하였는데, 외주부의 경우 재실자가 거주하는 내주부보다 인체에 미치는 영향이 작기 때문에 실내 공기 온도에 따라서 바닥 복사표면의 한계 온도가 더 높아져도 된다는 결과를 제시하였다. 바닥 표면의 한계 온도를 분석한 또다른 연구인 CENELEC¹¹²⁾의 결과에 따르면, 비재실영역의 경우에는 재실영역과 비교하였을 때 사람이 거주하지 않고, 차가운 창문의 영향으로 인해 실제 사람이 느끼는 복사 불쾌적은 작을 수 있으므로, 바닥 표면의 허용 한계 온도는 burn threshold hours로 판단할 수 있으며, 이에 따라 8시간 이상 노출이 되면 안되는 온도 조건으로 43°C를 제시하였다.

이와 같이 선행 연구에 따른 복사 난방 패널의 허용 가능한 표면 온도는 [Figure 4.4]와 같다. EN에서 제시된 기준은 상대적으로 보수적인 접근으로 산정된 값으로 실제로는 제시된 한계 온도 이상으로 표면온도를 설정하여도 복사불쾌적의 문제가 발생하지 않을 수 있다. 특히, 복사불쾌적의 경우에는

111) Wang Z, Op. cit., 2009

112) CENELEC, CENELEC Guide 29 Temperatures of hot surfaces likely to be touched, European committee for Electrotechnical Standardization. 2007

실내의 온도가 낮을수록 복사불균등으로 인해 재실자가 불쾌감을 느낄 가능성은 점점 낮아지기 때문에 EN의 기준이 실제 상황에서도 유효한 결과인지에 대해서는 의문이 제기될 수 있다. 앞선 언급한 바와 같이, 복사 난방 패널을 외주부에 적용할 경우 상대적으로 높은 표면 온도가 요구되므로 (특히, 천방 복사 난방 패널의 경우에는 허용 가능한 패널의 표면온도는 낮지만 패널에 요구되는 방열량에 따른 표면 온도는 높다) 본 연구에서는 복사 난방 패널의 외주부 적용 시, 필요 방열량에 따라 요구되는 패널의 허용 가능한 표면 온도를 Heat-balance approach 관점에서 접근한 EN 기준 뿐만 아니라 adaptive approach 관점에서 제시된 선행 연구의 결과의 허용 가능한 최대 표면 온도로 고려하여 복사 난방 패널의 표면 온도를 설정하고자 하며, 이때 적용되는 값이 재실자의 불쾌적을 유발하지 않는지는 두 가지 관점에서의 복사불쾌적 평가하고자 한다.



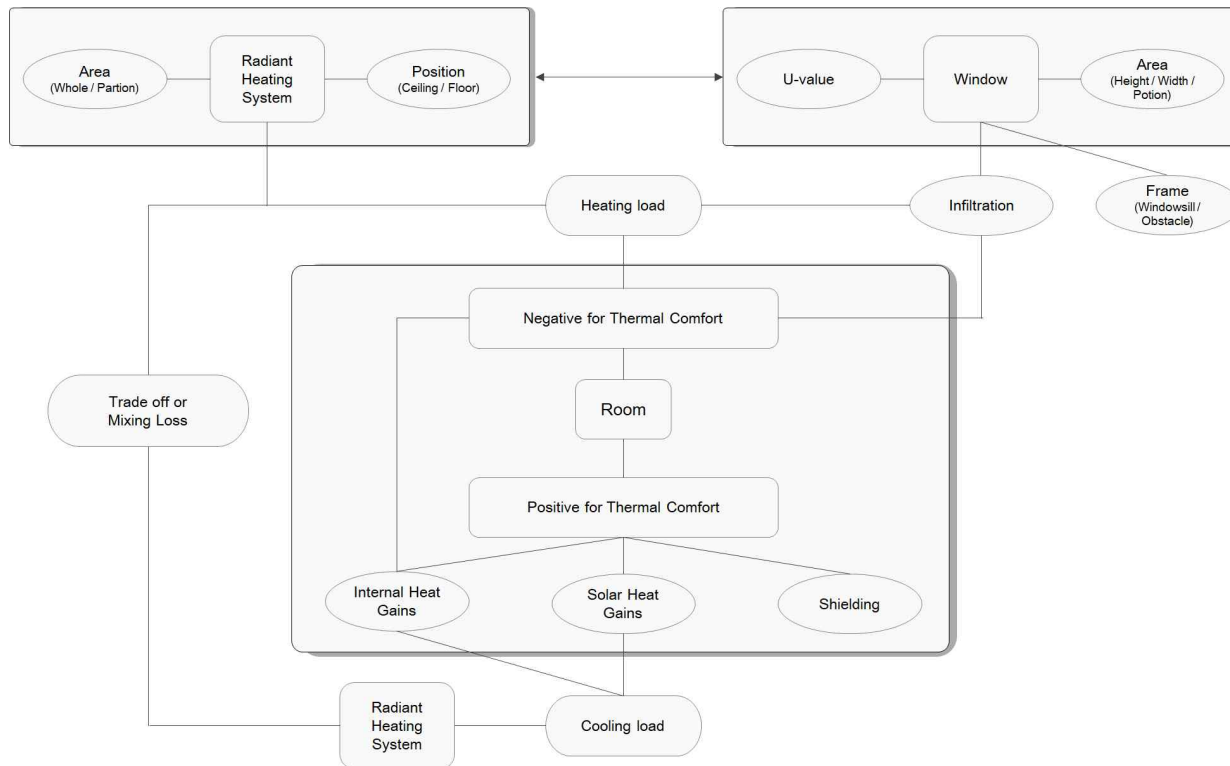
[Figure 4.4] Acceptable surface temperature range of radiant heating panel

4.2 시뮬레이션 케이스

건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가는 건물의 다양한 환경 요소와 이에 따른 패널의 방열 조건을 최대한 많이 반영하여 이때의 실내 환경 특성을 분석하고 복사 난방 패널의 방열 조건에 대해 일반화된 원칙을 적용할 수 있어야 하며, 이를 위한 시뮬레이션 케이스를 선정해야 한다. 이에 본 절에서는 복사 난방 패널이 외주부에 적용되었을 경우의 열쾌적성 평가 요소를 도출하고 각 요소들이 열쾌적성에 미치는 영향을 분석하여 재실자의 쾌적성에 영향을 주는 요소들의 영향을 반영할 수 있는 방열 조건 설정 프로세스에 따라 시뮬레이션 케이스를 선정하고자 한다.

4.2.1 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소

복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소는 [Figure 4.5]와 같이 앞서 도출된 결과에 따라 복사 난방 패널의 설계 요소와 건물의 실내 환경 요소로 구분할 수 있으며, 이때 건물의 실내 환경 요소는 재실자의 쾌적성에 긍정적으로 또는 부정적으로 작용하는 요소로 구분할 수 있다. 그리고 건물의 실외 환경 요소로는 외부 환경의 영향을 받아 건물 실내 공간에 영향을 주는 외피의 요소 (본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 벽체에 비해 창문의 단열성이 현저하게 낮으므로 외피에는 외부 환경의 전달 및 열쾌적성에 영향이 큰 창문만 있는 것으로 가정하였다.)도 있으며, 이러한 외피의 요소에는 외부 환경의 영향을 받는 창문의 단열성과 열쾌적성에 영향을 미치는 infiltration 그리고 난방 부하를 계산할 때 요구되는 창문 면적이 있다.(창문의 프레임도 기류의 흐름에 영향을 줄 수 있으나 본 연구에서는 고려하지 않았다.)



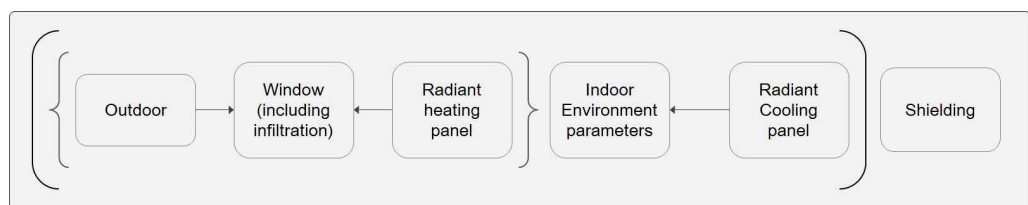
[Figure 4.5]
Parameters for thermal
comfort assessment of
RHP

건물 외주부 시스템을 통해 제거되어야 하는 난방 부하는 창문의 면적 및 단열성에 따라 달라지고 창문을 통한 침기의 영향이 반영되어 나타난다. 이와 같이 발생된 난방 부하는 창문에 인접해 있는 공기를 차갑게 하여 기류의 하강 흐름을 형성하는데, 기류의 하강 흐름은 난방 부하에 영향을 주는 창문의 설계 요소뿐만 아니라 창문의 프레임 및 창턱 등의 영향도 받게 하강하여 재실 영역으로 유입된다. 이렇게 유입되는 차가운 기류는 재실자의 불쾌적을 유발할 수 있으므로, 재실 영역에 유입되기 전에 복사 난방 패널의 방열을 통해서 처리해 주어야 한다. 복사 난방 패널의 방열은 방열 면적 및 표면온도 그리고 패널의 배치 위치 (본 연구에서는 천장 또는 바닥 복사 난방 패널만 해당됨)에 따라 방열 조건이 달라지게 되므로, 차가운 기류의 재실 영역 유입을 방지하기 위해 적합한 방열 조건을 도출하여 적용해야 한다. 이와 같은 창문의 통한 난방 부하는 복사 난방 패널의 적절한 방열 조건으로 제거하여 재실자의 쾌적성을 확보할 수 있다.

그러나 건물의 실내는 빈 공간이 아니라 재실자가 거주하고 활동하는 공간이기 때문에 이에 필요한 다양한 요소가 존재며, 이러한 요소는 건물의 실내 환경을 형성하고 난방 부하 및 복사 난방 패널의 방열 조건에 영향을 줄 수 있다. 건물 실내의 환경을 형성하는 요소는 난방 부하가 발생하는 시점을 기준으로 볼 때는, 난방 부하값에 (-)되는 요소 즉, 차가운 기류에 열을 공급해 주거나 차단하여 재실자의 쾌적성에 긍정적으로 작용하는 요소와 차가운 기류의 흐름을 증폭 시켜 재실자의 쾌적성에 부정적으로 작용하는 요소로 구분할 수 있다. 따라서 복사 난방 패널이 설치되는 경우에는 창문의 통한 난방 부하의 영향을 기본적으로 제거하면서 이와 같은 건물의 실내 환경 요소가 재실자의 쾌적성에 부정적으로 작용하지 않는 방향으로 방열 조건을 설정해야 한다.

그러나 난방 부하값에 (-)로 작용하여 재실자의 쾌적성에 긍정적으로 작용하는 요소는 다른 관점에서 보면 냉방 부하라 할 수 있으며, 건물의 환경 요소에 따라 형성되는 냉방 부하가 클 경우에는 실의 과열 현상으로 인해 재실자가 오히려 불쾌감을 느낄 수가 있다. 또한 난방 기간에도 일사의 영향을 받게 된다면 난방 부하 관점에서는 열쾌적성을 향상시킬 수 있지만, 다른 관점에서는 제거되어야 하는 냉방 부하가 될 수도 있다. 이와 같은 냉방 부하는 에너지 관점에서 볼 때는 난방 부하값과 trade-off될 수 있지만, 쾌적성의 관점에서 볼 때는 재실영역으로 유입되는 차가운 기류를 흐름을 방지할 수 없으므로 냉방 부하 제거를 위한 복사 냉방 패널이 추가적으로 적용되어야 한다. 이와 같은 경우에는 창문을 통한 불쾌적은 복사 난방 패널이, 건물 실내의 과열 현상으로 인한 불쾌적은 복사 냉방 패널이 담당하게 되는데, 복사 난방 패널과 복사 냉방 패널 사이에 혼합 손실이 발생할 수도 있고, 복사불균등의 문제가 심해질 수도 있다.

따라서 건물 외주부에 복사 난방 패널을 적용하기 위해서는 건물의 실을 기준으로 즉, 재실자의 쾌적성을 기준으로 하여 이에 영향을 주는 모든 요소를 고려하여 적절한 방열 조건을 설정해주어야 한다. 이와 같은 재실자의 쾌적성에 영향을 주는 모든 요소들의 영향을 반영한 복사 난방 패널의 방열 조건은 [Figure 4.6]과 같은 프로세스로 선정할 수 있다.



[Figure 4.6] Process of thermal output set-up

먼저, 외부 환경의 영향을 반영하는 창문과 이에 따른 복사 난방 패널의 적정 방열 조건을 설정한 후에, 여기에 영향을 미치는 건물의 실내 환경 요소와 실내 환경 요소를 제거해야 하는 냉방 부하값으로 판단했을 때 적용되는 복사 냉방 패널에 따라 복사 난방 패널의 방열 조건이 어떻게 달라질 수 있는지 분석한다. 그리고 부하에 영향을 미치지 않는 차가운 기류의 흐름을 차단할 수 있는 요소도 고려하여 복사 난방 패널의 최적 방열 조건을 제시한다. 이에 다음 절에서는 외부 환경 조건의 영향에 따른 복사 난방 패널의 최적 방열 조건을 도출하여, 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방향성을 설정하고자 한다.

4.2.2 열쾌적성 평가를 위한 시뮬레이션 케이스

앞서 제시된 복사 난방 패널의 방열 조건 설정을 위한 프로세스에 따라 시뮬레이션 케이스를 선정하였다.

먼저, 난방기의 낮은 외기온에 의해 차가워진 창문과 창문 및 창문 근처의 공기에 열을 공급하여 재실자의 쾌적성을 향상시키고자 하는 복사 난방 패널의 방열 조건 사이의 관계성을 분석하여, 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 열쾌적성을 확보할 수 있는 기본적인 방열 조건을 도출하기 위한 시뮬레이션 케이스를 선정하였다. 이와 같은 시뮬레이션 케이스는 차가운 창문과 복사 난방 패널의 관계성에 따른 방열 조건으로 건물의 실내외 환경 조건 및 내주부에 적용되는 복사 난방 패널과의 관계성에 따른 최적 방열 조건을 설정하기에 앞서 방열 조건 설정 시 방향성을 제시하기 위한 시뮬레이션 케이스로 열쾌적성 평가 및 방열 조건 설정의 기본 케이스로 활용하고자 한다.

차가운 창문과 복사 난방 패널의 관계성에 따른 열쾌적성 평가 및 방열 조건이 설정되면, 다음으로는 건물의 실내 환경 요소의 영향을 반영한 평가가 수행되어야 하며, 이때 건물의 실내 환경 요소는 실내에서의 내부 발열이 된다. 내부 발열의 영향을 평가하기 위해서는 내부 발열로 인해 제거해야 되는 부하를 그대로 두어 실내의 열평형 온도 이상의 온도 조건이 형성되도록 할지, 아니면 난방 부하에 포함하여 난방 부하값을 낮출 수 있는 요소로 판단하여 처리할지, 또는 제거해야 하는 냉방 부하로 판단하여 복사 냉방 패널을 추가하여 처리할지로 크게 구분할 수 있다. 난방 기간 내에 발생하는 내부 발열은 실내를 열을 공급하는 개념이기 때문에 채실자의 쾌적성 측면에서는 긍정적으로 작용할 수 있다. 그러나 내부 발열량과 복사 난방 패널의 방열량에 따라 내부 발열을 어느 정도 수준까지 그대로 둘 수 있는지에 대해 평가해야 한다. 즉, 내부 발열로 인해 오히려 실내가 과열되어 이로 인한 채실자의 불쾌적이 유발될 수도 있고, 내부 발열로 인해 천장면으로 상승한 기류가 천장면을 타고 창문 부근으로 흘러와 창문 근처에서의 차가운 공기에 영향을 미쳐 하강 기류를 증폭시킬 수도 있으므로 열쾌적성 측면에서 허용 가능한 내부 발열의 명확한 기준이 제시되어야 한다.

그리고 내부 발열을 난방 부하에 포함하여 처리한다는 것은, 실에 난방 부하가 있을 때 내부 발열로 발생한 냉방 부하로 인해 난방 부하값이 줄어들고 이에 따라 복사 난방 패널이 담당해야 하는 난방 부하량이 줄어들어 패널의 방열량도 감소하는 것을 의미한다. 이 경우는 난방 부하값이 내부 발열로 인한 냉방 부하보다 큰 경우에만 고려할 수 있으며, 이때 적용되는 패널의 방열량으로 채실자의 쾌적성을 확보할 수 있어야 한다.

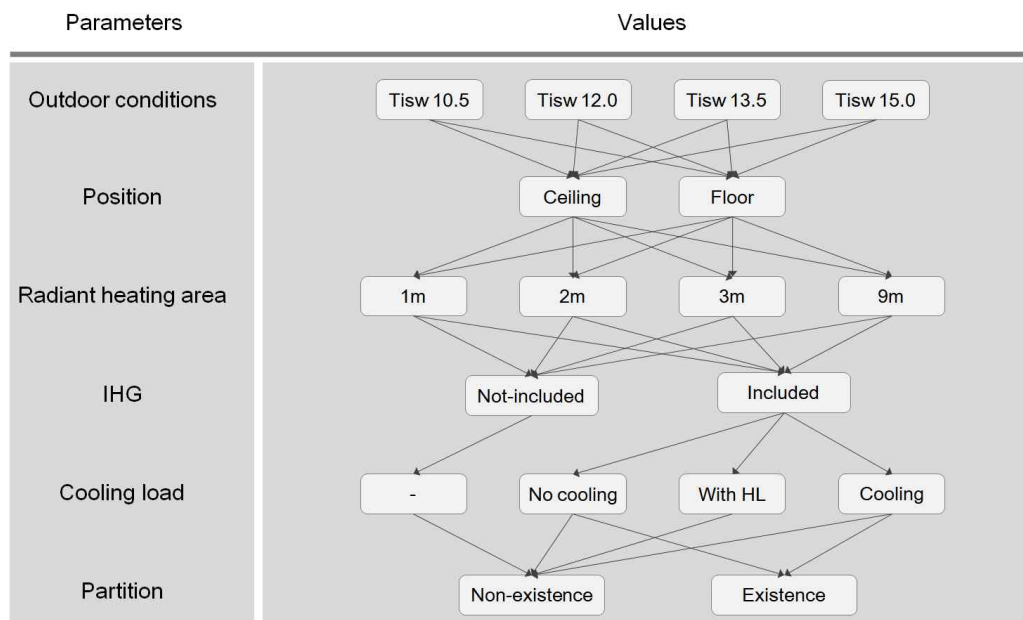
내부 발열로 인한 냉방 부하를 담당하기 위해 복사 냉방 패널을 추가하는 경우는 냉방 부하에 따라 복사 냉방 패널의 방열량이 결정되며, 이때의

방냉량은 실내 온열 환경 및 기류 흐름에 영향을 주게 된다. 따라서 냉방 부하량에 따른 재실자의 열쾌적성 평가가 수행되어야 한다. 복사 냉방 패널이 추가되는 경우에는 실에서 발생된 난방 부하는 복사 난방 패널이, 실에서 발생된 냉방 부하는 복사 냉방 패널이 처리하는 것으로 가정하였다. 일반적으로 내부 발열로 인한 냉방 부하는 과대평가되는 경우가 많으므로 (실제 냉방 부하가 크더라도 냉방 부하로 인한 실내 과열 현상 및 재실자의 불쾌적은 발생하지 않는 경우가 많다. 난방기에 내부발열로 발생된 냉방 부하를 제거하고자 복사 냉방 패널을 통하여 방냉을 하게 되면, 패널의 차가운 표면 온도로 인하여 오히려 재실자의 불쾌적이 발생할 수 있으므로 실내 쾌적성의 측면에서는 냉방 부하를 위한 냉방은 하지 않거나 적게 하는 것이 유리하다.) 표준 대상 공간으로 선정된 실의 실제 냉방 부하를 기준으로 냉방 부하 값이 이보다 작은 경우에 대해 고려하는 것으로 시뮬레이션을 수행하도록 한다. 즉, 방냉량이 가장 높은 경우를 기준으로 하여 방냉량이 점점 작아질수록 재실자의 열쾌적성이 어떻게 달라지는지를 제시하기 위한 시뮬레이션 케이스를 선정하였다. 또한 냉난방 부하가 동시에 있을 때, 복사 난방 패널과 복사 냉방 패널의 면적비를 어떻게 할지도 고려해야 하는데, 외주부에 적용되는 복사 난방 패널의 면적을 기준으로 천장면 또는 바닥면 전체 면적 중 외주부에 적용되는 복사 난방 패널의 면적을 제외한 나머지 면적을 복사 냉방 패널의 면적으로 설정한다.

그리고 실의 부하값에 영향을 주지는 않지만 재실자의 쾌적성에는 영향을 주는 요소도 고려하여 시뮬레이션 케이스를 선정해야 한다. 이와 같은 요소에는 파티션 및 책상 등이 있는데(통칭하여 Shielding으로 명명), 부하값에는 영향을 미치지 않지만 창문 및 복사 난방 패널, 내부 발열 등으로 인한 실에서의 자연 대류 흐름에 영향을 미치게 되므로 이에 따라 재실자의 쾌적

성이 달라질 수 있다. 따라서 앞서 제시된 Shielding의 모델링 방법에 따라 이를 평가할 수 있는 시뮬레이션 케이스를 추가로 적용하여 이때의 열쾌적성을 평가하도록 한다.

여기까지는 건물의 환경 요소에 따른 시뮬레이션 case 선정 방법이며, 이에 앞서 평가된 외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 적용 방법을 추가로 적용하여 시뮬레이션 case를 선정해야 한다. 즉, 외부 환경 조건과 창문의 높이, 동일한 방열량 내에서의 복사 난방 패널의 방열면적 및 표면 온도 등에 따라 시뮬레이션 case의 경우의 수는 증가하게 된다. 이와 같은 방법으로 복사 난방 패널의 설계 요소 및 건물의 실내외 환경 요소에 따른 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 시뮬레이션 case의 경우의 수는 [Figure 4.7]과 같다.



[Figure 4.7] Number of cases for thermal comfort assessment

내부발열로 인한 냉방 부하량은 앞서 도출된 인체, 조명, 기기별 발열량에 따라 식 (4.15)와 같이 계산하였다.

$$Q_{CL} = (IHG_p \times n) + (IHG_l \times n) + (IHG_e \times n) \quad (4.15)$$

Q_{CL} : cooling load [W]
 IHG_i : value of each internal heat gain[W]
 t_{room} : number of internal heat gain parameters [-]

앞서 시뮬레이션 모델을 구축 시, 인체, 조명, 기기의 모델을 제시하였으며, 이에 따르면 냉방 부하는 항상 일정한 값이 된다. 그러나 시뮬레이션 케이스에 따라 냉방 부하가 줄어드는 경우도 고려해야 하며, 이러한 경우 조명은 항상 설치되어 있는 것으로 가정하여 전체 냉방 부하량에 상관없이 일정한 부하량을 가지며, 이에 따라 인체와 기기의 부하량을 줄여 열쾌적성 평가를 수행하도록 한다. 그리고 복사 냉방 패널의 방냉량은 EN에서 제시된 계산식에 따라 식 (4.16)과 같이 설정하였다.

$$q_p = 8.92(t_{room} - t_{rsurf})^{1.1} \text{ Radiant ceiling cooling Panel} \quad (4.16)$$

q_p : the heat flow density of radiant cooling panel [W/m²]
 t_{rsurf} : the average surface temperature of radiant cooling panel [°C]
 t_{room} : the nominal indoor temperature [°C]

이에 따라 선정된 시뮬레이션 case는 총 84개로 <Table 4.5> ~ <Table 4.10>과 같다.

<Table 4.5> Thermal output conditions and load ratio of Case A

Case	Outdoor conditions		Cooling load [W]	Position	Thermal output conditions				Heating load Including IHG [–]	Shielding [–]
	Tisw [–]	Heating load [W]			Heating panel		Cooling panel			
					Heating Area [m²]	Surface temp [°C]	Cooling Area [m²]	Surface temp [°C]		
A_(1)	10.5	1786.25	–	Ceiling	8.1 (1)	56.75	–	–	–	Non –existence
A_(2)					16.2 (2)	38.38				
A_(3)					24.3 (3)	32.25				
A_(4)					72.9 (9)	24.08				
A_(5)	12.0	1332.35			8.1 (1)	47.41				
A_(6)					16.2 (2)	33.71				
A_(7)					24.3 (3)	29.14				
A_(8)					72.9 (9)	23.05				
A_(9)	13.5	761.24			8.1 (1)	35.66				
A_(10)					16.2 (2)	27.83				
A_(11)					24.3 (3)	25.22				
A_(12)					72.9 (9)	21.74				
A_(13)	15.0	510.32			8.1 (1)	30.50				
A_(14)					16.2 (2)	25.25				
A_(15)					24.3 (3)	23.50				
A_(16)					72.9 (9)	21.17				

() is distance from window (unit is m)

<Table 4.6> Thermal output conditions and load ratio of Case B

Case	Outdoor conditions		Cooling load [W]	Position	Thermal output conditions				Heating load Including IHG [–]	Shielding [–]
	T _{isw} [–]	Heating load [W]			Heating panel		Cooling panel			
					Heating Area [m²]	Surface temp [°C]	Cooling Area [m²]	Surface temp [°C]		
B_(1)	10.5	1786.25	–	Floor	8.1 (1)	38.47	–	–	–	Non –existence
B_(2)					16.2 (2)	29.84				
B_(3)					24.3 (3)	26.80				
B_(4)					72.9 (9)	22.51				
B_(5)	12.0	1332.35			8.1 (1)	34.15				
B_(6)					16.2 (2)	27.53				
B_(7)					24.3 (3)	25.21				
B_(8)					72.9 (9)	21.92				
B_(9)	13.5	761.24			8.1 (1)	28.51				
B_(10)					16.2 (2)	24.53				
B_(11)					24.3 (3)	23.13				
B_(12)					72.9 (9)	21.15				
B_(13)	15.0	510.32			8.1 (1)	25.91				
B_(14)					16.2 (2)	23.15				
B_(15)					24.3 (3)	22.18				
B_(16)					72.9 (9)	20.80				

() is distance from window (unit is m)

<Table 4.7> Thermal output conditions and load ratio of Case C

Case	Outdoor conditions		Cooling load [W]	Position	Thermal output conditions				Heating load Including IHG [–]	Shielding [–]
	Tisw [–]	Heating load [W]			Heating panel		Cooling panel			
					Heating Area [m²]	Surface temp [°C]	Cooling Area [m²]	Surface temp [°C]		
C_(1)	12.0	1332.35	1940	Ceiling	8.1 (1)	47.41	–	–	–	Non –existence
C_(2)					16.2 (2)	33.71				
C_(3)					24.3 (3)	29.14				
C_(4)					72.9 (9)	23.05				
C_(5)	13.5	761.24			8.1 (1)	35.66				
C_(6)					16.2 (2)	27.83				
C_(7)					24.3 (3)	25.22				
C_(8)					72.9 (9)	21.74				
C_(9)	12.0	1332.35	8.1 (1)		47.41					
C_(10)			16.2 (2)		33.71					
C_(11)			24.3 (3)		29.14					
C_(12)			72.9 (9)		23.05					
C_(13)	13.5	761.24	8.1 (1)		35.66					
C_(14)			16.2 (2)		27.83					
C_(15)			24.3 (3)		25.22					
C_(16)			72.9 (9)		21.74					

() is distance from window (unit is m)

<Table 4.8> Thermal output conditions and load ratio of Case D

Case	Outdoor conditions		Cooling load [W]	Position	Thermal output conditions				Heating load Including IHG [–]	Shielding [–]
	T _{isw} [–]	Heating load [W]			Heating panel		Cooling panel			
					Heating Area [m²]	Surface temp [°C]	Cooling Area [m²]	Surface temp [°C]		
D_(1)	12.0	1332.35	1940	Floor	8.1 (1)	34.15	–	–	–	Non –existence
D_(2)					16.2 (2)	27.53				
D_(3)					24.3 (3)	25.21				
D_(4)					72.9 (9)	21.92				
D_(5)	13.5	761.24			8.1 (1)	28.51				
D_(6)					16.2 (2)	24.53				
D_(7)					24.3 (3)	23.13				
D_(8)					72.9 (9)	21.15				
D_(9)	12.0	1332.35	8.1 (1)		34.15					
D_(10)			16.2 (2)		27.53					
D_(11)			24.3 (3)		25.21					
D_(12)			72.9 (9)		21.92					
D_(13)	13.5	761.24	8.1 (1)		28.51					
D_(14)			16.2 (2)		24.53					
D_(15)			24.3 (3)		23.13					
D_(16)			72.9 (9)		21.15					

() is distance from window (unit is m)

<Table 4.9> Thermal output conditions and load ratio of Case E

Case	Outdoor conditions		Cooling load [W]	Position	Thermal output conditions				Heating load Including IHG [–]	Shielding [–]
	Tisw [–]	Heating load [W]			Heating panel		Cooling panel			
					Heating Area [m²]	Surface temp [°C]	Cooling Area [m²]	Surface temp [°C]		
E_(1)	12.0	1332.35	1080	Ceiling	8.1 (1)	25.19	–	–	Including	Non –existence
E_(2)					16.2 (2)	22.60				
E_(3)					24.3 (3)	21.73				
E_(4)					72.9 (9)	20.58				
E_(5)				Floor	8.1 (1)	23.12				
E_(6)					16.2 (2)	21.66				
E_(7)					24.3 (3)	21.15				
E_(8)					72.9 (9)	20.42				

() is distance from window (unit is m)

〈Table 4.10〉 Thermal output conditions and load ratio of Case F

Case	Outdoor conditions		Cooling load [W]	Position	Thermal output conditions				Heating load Including IHG [–]	Shielding [–]		
	Tisw [–]	Heating load [W]			Heating panel		Cooling panel					
					Heating Area [m²]	Surface temp [°C]	Cooling Area [m²]	Surface temp [°C]				
F_(1)	12.0	1332.35	1940	Ceiling	8.1 (1)	47.41	64.8 (8)	17.01	–	Non –existence		
F_(2)					16.2 (2)	33.71	56.7 (7)	16.61				
F_(3)					24.3 (3)	29.14	48.6 (6)	16.09				
F_(4)	13.5	761.24			8.1 (1)	35.66	64.8 (8)	17.01				
F_(5)					16.2 (2)	27.83	56.7 (7)	16.61				
F_(6)					24.3 (3)	25.22	48.6 (6)	16.09				
F_(7)	12.0	1332.35		Floor	8.1 (1)	34.15	64.8 (8)	17.01				
F_(8)					16.2 (2)	27.53	56.7 (7)	16.61				
F_(9)					72.9 (9)	21.92	48.6 (6)	16.09				
F_(10)					13.5	761.24	8.1 (1)	28.51			64.8 (8)	17.01
F_(11)							16.2 (2)	24.53			56.7 (7)	16.61
F_(12)							72.9 (9)	21.15			48.6 (6)	16.09
F_(13)	12.0	1332.35		Ceiling	8.1 (1)	47.41	64.8 (8)	17.01		Existence		
F_(14)					–	8.1 (1)	47.41	–			–	
F_(15)				1940	72.9 (9)	23.05	–	–				
F_(16)				–	Floor	8.1 (1)	34.15	64.8 (8)			22.99	

() is distance from window (unit is m)

4.3 시뮬레이션 결과

건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하고 재실자의 열쾌적성을 확보할 수 있는 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하기 위하여 복사 난방 패널의 방열 조건에 따라 재실영역이 시작되는 지점 (창문으로부터 1m 떨어진 지점)에서의 draft rate과 draft rate 기준값을 Class A를 기준으로 할 때 창문면을 기준으로 하여 기준 범위 이하로 내려가는 지점, 즉 열쾌적성을 확보할 수 있다고 판단할 수 있는 지점을 도출하였다. 또한 각 케이스별 downdraft의 저감 가능성을 판단하기 위하여 decay ratio를 계산하였으며, 복사 난방 패널의 높은 표면온도로 인한 열쾌적성도 분석하기 위하여 radiant asymmetry값도 계산하였다.

건물 실내에서의 차가운 기류 흐름은 기류가 하강하기 때문에 바닥면을 타고 실내로 유입되며, 창문을 기준으로 좌우측으로 확산된 기류는 단열조건인 벽체를 타고 천장면으로 올라가 실의 가운데로 다시 흘러오기 때문에 실의 너비를 기준으로 가운데 지점이 열쾌적성을 평가하기에 가장 적합한 지점이 된다. 따라서 실의 너비, 즉 창문 축을 기준으로 했을 때 가운데를 기준으로 시뮬레이션 결과값을 도출하였다. 또한 downdraft와 같은 국부적인 불쾌감은 차가운 기류가 재실자의 피부에 직접 닿게 되면, 피부로부터의 열을 빼앗겨 냉각효과로 인하여 차가움을 느끼게 되는 것이므로 외부에 노출된 신체 부위에서 Draft로 인한 불쾌감을 유발한 가능성이 더 높다. 따라서 Downdraft의 평가는 재실자가 앉아서 작업할 때 노출되는 부위인 발목 높이 0.1m와 목 높이 1.2m를 평가 지점으로 선정¹¹³⁾하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 결과는 <Table 4.11>과 같다.

113) Lin Tian et al., The impact of temperature on mean local air age and thermal comfort in a stratum ventilated office, Building and Environment 46, 2011 pp501-510.

<Table 4.11> Simulation results

Case	Draft rate* [%]		Position ** [m]		Decay ratio [%]		RAT *** [°C]
	H 0.1	H 1.1	H 0.1	H 1.1	H 0.1	H 1.1	
A_(1)	20.89	20.14	6.0	5.6	42.68	46.08	1.28
A_(2)	18.89	17.89	6.2	5.8	43.97	47.95	1.26
A_(3)	19.48	18.58	6.2	5.8	43.17	46.91	1.25
A_(4)	22.08	21.13	8.2	7.6	27.64	32.41	1.24
A_(5)	17.19	16.48	3.4	3.2	64.09	66.59	0.95
A_(6)	17.01	16.34	3.2	3.2	65.64	66.85	0.93
A_(7)	17.68	16.71	3.6	3.4	62.03	64.92	0.93
A_(8)	18.51	17.65	5.4	5.0	49.51	53.33	0.92
A_(9)	14.48	13.22	2.2	2.0	77.03	81.57	0.44
A_(10)	14.72	13.44	2.2	1.8	76.47	82.20	0.43
A_(11)	14.77	13.88	2.0	1.4	77.60	83.52	0.43
A_(12)	15.03	14.21	2.4	1.6	74.52	81.44	0.43
A_(13)	11.55	10.25	1.2	1.0	92.04	98.78	0.25
A_(14)	11.54	10.21	1.4	1.2	90.83	97.72	0.25
A_(15)	11.57	10.47	1.2	1.2	91.97	96.51	0.25
A_(16)	11.59	10.57	1.2	1.2	91.89	96.05	0.25
B_(1)	17.23	17.02	5.2	4.8	52.77	55.63	2.63
B_(2)	17.68	16.55	5.6	4.6	49.53	57.71	2.44
B_(3)	17.98	16.98	5.2	5.0	51.56	54.45	2.37
B_(4)	20.22	19.45	6.8	6.4	38.48	41.96	2.27
B_(5)	14.94	13.75	4.4	3.8	62.22	68.86	2.06
B_(6)	14.95	13.88	4.6	3.8	60.94	68.52	1.91
B_(7)	15.12	14.07	4.8	3.2	59.32	71.79	1.86
B_(8)	16.58	15.98	5.2	4.6	53.91	58.79	1.78
B_(9)	13.38	12.95	3.4	3.0	72.37	76.11	1.36
B_(10)	13.27	12.87	2.8	2.4	76.43	80.10	1.27
B_(11)	13.31	12.94	3.2	3.0	73.82	76.14	1.24
B_(12)	13.68	13.22	3.6	3.2	70.30	74.07	1.20
B_(13)	12.09	11.89	1.8	1.6	86.36	88.30	0.98
B_(14)	12.08	11.88	1.8	1.6	86.39	88.34	0.92
B_(15)	12.10	11.98	2.0	1.8	85.07	86.74	0.90
B_(16)	12.30	12.02	2.2	1.8	83.15	86.60	0.87

* Value of draft rate when the occupation area is starting

** Distance from window when the draft rate falls below class A

*** Radiant asymmetry temperature

〈Table 4.11〉 Simulation results – continued

Case	Draft rate* [%]		Position ** [m]		Decay ratio [%]		RAT *** [°C]
	H 0.1	H 1.1	H 0.1	H 1.1	H 0.1	H 1.1	
C_(1)	12.27	11.89	1.8	1.6	85.75	88.30	0.89
C_(2)	12.57	12.25	1.8	1.6	84.78	87.07	0.88
C_(3)	12.79	12.33	1.8	1.8	84.09	85.55	0.88
C_(4)	13.55	13.17	2.2	2.0	79.40	81.72	0.87
C_(5)	9.89	9.62	0.8	0.8	100.00	100.00	0.37
C_(6)	10.02	9.79	1.2	1.0	98.65	100.00	0.37
C_(7)	10.12	9.88	1.2	1.0	98.16	100.00	0.37
C_(8)	10.47	10.03	1.2	1.2	96.51	98.60	0.36
C_(9)	14.55	14.01	2.2	2.0	76.86	79.44	0.88
C_(10)	14.58	14.12	2.4	2.0	75.54	79.16	0.88
C_(11)	14.98	14.56	2.4	2.2	74.63	76.84	0.88
C_(12)	15.54	15.02	2.8	2.6	70.93	73.29	0.87
C_(13)	11.75	11.47	1.8	1.6	87.55	89.84	0.37
C_(14)	11.85	11.55	1.6	1.4	88.44	90.79	0.37
C_(15)	11.95	11.63	1.6	1.6	88.09	89.24	0.37
C_(16)	12.17	11.82	2.0	1.8	84.83	87.30	0.36
D_(1)	11.46	11.02	1.6	1.4	89.88	92.87	2.06
D_(2)	11.72	11.25	1.8	1.6	87.66	90.69	1.91
D_(3)	11.85	11.54	1.8	1.8	87.19	88.33	1.86
D_(4)	12.52	12.89	2.4	2.2	81.19	81.29	1.78
D_(5)	10.04	9.82	1.2	1.0	98.55	100.00	1.36
D_(6)	10.21	9.88	1.2	1.0	97.72	100.00	1.27
D_(7)	10.27	9.78	1.2	1.0	97.44	100.00	1.24
D_(8)	10.48	10.14	1.4	1.2	95.21	98.06	1.20
D_(9)	12.68	12.32	1.8	1.8	84.43	85.58	2.06
D_(10)	12.74	12.34	1.8	1.8	84.25	85.52	1.91
D_(11)	12.85	12.56	2.0	1.8	82.66	84.81	1.87
D_(12)	13.58	13.02	2.4	2.2	78.07	80.90	1.79
D_(13)	11.26	11.08	1.4	1.2	91.90	93.88	1.36
D_(14)	11.42	11.01	1.4	1.2	91.28	94.16	1.26
D_(15)	11.48	11.18	1.4	1.2	91.05	93.47	1.25
D_(16)	11.72	11.22	1.4	1.4	90.16	92.06	1.21

* Value of draft rate when the occupation area is starting

** Distance from window when the draft rate falls below class A

*** Radiant asymmetry temperature

<Table 4.11> Simulation results – continued

Case	Draft rate* [%]		Position ** [m]		Decay ratio [%]		RAT *** [°C]
	H 0.1	H 1.1	H 0.1	H 1.1	H 0.1	H 1.1	
E_(1)	22.78	22.42	2.8	2.6	60.70	62.30	0.26
E_(2)	22.45	22.32	2.8	2.4	61.02	63.65	0.27
E_(3)	22.98	22.85	3.0	2.6	59.26	61.88	0.27
E_(4)	25.25	24.98	4.4	4.0	48.55	51.27	0.28
E_(5)	23.88	23.68	3.2	3.0	57.19	58.61	0.83
E_(6)	23.48	23.22	3.2	2.8	57.54	60.28	0.84
E_(7)	23.99	23.74	3.4	3.0	55.84	58.56	0.86
E_(8)	26.78	25.89	4.6	4.2	46.17	49.31	0.88
F_(1)	17.58	17.02	2.6	2.4	68.44	70.63	2.13
F_(2)	17.65	17.15	2.8	2.4	67.08	70.40	1.83
F_(3)	17.89	17.46	2.8	2.6	66.70	68.64	1.53
F_(4)	15.48	14.58	2.4	2.0	73.55	78.04	1.61
F_(5)	15.66	14.32	2.4	2.0	73.18	78.67	1.31
F_(6)	15.75	14.78	2.6	2.2	71.75	76.33	1.01
F_(7)	18.25	17.82	3.0	2.6	64.90	68.06	2.54
F_(8)	18.33	17.88	3.2	3.0	63.53	65.46	1.91
F_(9)	18.48	17.95	3.2	3.2	63.31	64.11	1.26
F_(10)	16.25	15.98	2.6	2.4	70.77	72.54	0.05
F_(11)	16.32	16.12	2.8	2.8	69.39	69.77	0.30
F_(12)	16.37	16.25	3.0	2.8	68.04	69.52	0.62
F_(13)	17.68	16.43	2.6	2.4	68.28	71.68	2.11
F_(14)	17.34	16.58	4.4	3.6	57.59	63.91	0.86
F_(15)	14.58	14.15	2.2	2.0	76.79	79.09	0.87
F_(16)	18.27	17.23	3.6	3.4	61.12	64.02	0.55

* Value of draft rate when the occupation area is starting

** Distance from window when the draft rate falls below class A

*** Radiant asymmetry temperature

이와 같이 도출된 시뮬레이션 결과를 토대로 건물 외주부에서의 복사 난방 패널의 방열 조건에 따른 downdraft를 평가하였으며, 또한 복사 난방 패널의 방열 조건에 따른 복사불쾌적에 대해서도 평가하였다. 그리고 앞서 복사 난방 패널을 열쾌적성 측면에서 건물 외주부에 적용 가능한 가장 이상적인 시스템으로 제시하였는데, 이는 물리적인 현상을 개념적으로 해석하여

제시한 가정이며, 실제로 제시된 가정이 맞는지 검토가 필요하다. 따라서 일반적으로 적용되고 있는 대류 난방 형태의 외주부 시스템과 복사 난방 패널 간의 열쾌적성을 비교 평가하였다.

4.3.1 건물 외주부에서의 downdraft 평가

외부 환경 조건에 따른 천장 복사 난방 패널의 downdraft를 평가한 시뮬레이션 케이스 A의 결과들을 살펴보면, 대부분의 경우 창문 근처에서의 draft rate 수치가 높게 나타났는데 이는 천장 복사 난방 패널이 좁은 면적에서 높은 온도로 방열할 때는 천장복사난방시스템과 창문의 온도차이가 높아서 시스템을 통해 방열되는 따뜻한 공기와 창문에 인접한 부근에서 형성되는 차가운 공기가 혼합하여 공기의 온도를 상승하면서 밀도가 낮아져서 천장면으로 공기가 상승하게 되고 이때의 천장효과로 인해 창문 근처로 기류가 재유입되어 기류의 속도를 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 방열면적이 상대적으로 가장 큰 (또는 깊이가 가장 깊은) 조건에서는 낮은 표면 온도로 인해 단위 면적당 방열량이 상대적으로 작아 창문 근처의 차가운 기류에 충분한 열을 공급하지 못하여 draft rate의 수치가 가장 높은 수준으로 나타났다. 한편, 외부 환경 조건이 일반적인 수준일 경우(외기온이 높아졌거나 창문의 단열성능이 향상된 경우)에는 천장 복사 난방 패널을 좁은 면적에서 높은 온도로 방열할 때 draft rate의 수치가 가장 낮게 나타났다. 이는 앞선 경우와 마찬가지로 창문 부근의 차가운 공기와 복사 난방 패널에서 방열되는 따뜻한 공기가 혼합되어 기류 속도는 높이지만, 창문 부근에서 하강하여 실내로 유입되는 공기의 온도가 높아져서 draft rate의 값이 낮게 나타난 결과로 판단된다.

한편, 외부 환경 조건에 따른 바닥 복사 난방 패널의 downdraft를 평가한 케이스 B의 결과들을 보면, 바닥면에서의 방열에 따른 draft rate을 평가한 Schellen¹¹⁴⁾의 연구와 유사하게 창문 아래쪽에서 높은 draft rate의 값을 보이지만 기류가 실내로 유입될수록 기류 속도는 점차 낮아지고 실내온도는 조금씩 높아져서 draft rate의 값이 점점 작아지는 경향을 보인다. 반면, 바닥면 전체에 바닥 복사 난방 패널이 적용된 경우에는 낮은 표면온도로 인하여 창문에 인접해 있는 공기에 충분한 열을 공급하기 못하여 창문 근처에서의 공기가 냉각된 상태로 하강하는 현상과 차가운 기류가 채실영역에 유입되는 현상을 차단하지 못하여 draft rate의 수치가 가장 높게 나타나는 결과를 보였다. 방열면적이 가장 좁게 적용된 경우에는 방열 온도와 창문측 공기와의 온도차가 높아서 기류 속도가 다른 케이스와 비교하였을 때 가장 크게 분포하였으나, 높은 온도로 열을 공급하여 바닥 근처 공기의 온도가 높게 형성되었기 때문에 draft rate 수치는 상대적으로 낮게 나타났다. 외부 환경 조건이 보통 수준인 경우에는 바닥 복사난방의 적용만으로도 draft rate의 수치가 기준치를 만족시키는 결과를 나타내었으며, 다만 채실영역에서 draft rate의 수치가 높게 나타나는 부분의 분포는 바닥 복사난방의 적용 면적이 넓어지면서 조금씩 커지는 경향을 보였다. 그리고 외부 환경 조건이 혹독한 경우에는 바닥 복사 난방의 decay ratio가 천장 복사 난방보다 높았지만, 외부 환경 조건이 일반적인 수준으로 향상될수록 천장 복사 난방의 decay ratio나 downdraft 저감하기에 유리한 것으로 나타났다.

또한 내부발열의 영향을 반영한 시뮬레이션 케이스 C,D의 결과들을 살펴보면, 내부 발열이 실내의 발열체로 작용하였기 때문에 공기의 온도를 상승시켜 downdraft로 인한 불쾌감을 저감시키는 결과를 가져왔다. 내부 발열로

114) L. Schellen et al., Op. cit., pp290-301

인한 발생된 기류가 천장면으로 타고 창문측으로 유입되어 기류의 속도를 상승시켜 차가운 기류의 흐름을 증폭시킬 수도 있을 것으로 판단하였으나, 시뮬레이션의 결과로 볼 때는 기류 속도의 상승보다 공기를 가열시키거나 열을 공급한 영향이 더 커서 재실자의 쾌적성 관점에서는 내부 발열로 인한 영향은 positive하다고 판단할 수 있다. 그리고 실의 냉방 부하를 난방 부하에 포함시키게 될 경우 시뮬레이션 케이스 E의 결과로 확인할 수 있듯이 창문 근처에서 충분한 열을 공급하지 못하여 창문 근처에서의 공기의 냉각 현상 및 하강 기류가 재실자의 불쾌감을 유발할 수 있을 정도로 높은 draft rate 수치를 나타내었다.

내부 발열을 실의 냉방부하로 판단하고 복사 냉방 패널을 적용한 시뮬레이션 케이스 F의 결과들을 살펴보면, 난방기의 설정 온도를 기준으로 냉방을 해주었기 때문에 천장면에서 차가운 기류가 발생하여 창문 근처에서 차가운 공기의 하강 현상을 증폭시키고, 외주부에 적용된 복사 난방의 열과 혼합되어서 draft rate의 값이 창문 근처에서 높게 나타났으며, 천장면의 차가운 기류도 재실영역으로 유입되어 재실영역에서의 draft rate값도 높게 나타났다. 또한 외부 환경 조건이 일반적이어도 냉방으로 인한 재실자의 불쾌감은 그대로 나타났다. 마지막으로 shielding의 영향을 평가한 시뮬레이션 케이스 F의 결과들을 살펴보면, shielding이 없는 경우와 시뮬레이션 결과에 차이가 없었는데 이는 shielding은 차가운 기류의 흐름을 막는 역할을 할 뿐, 실내의 기류나 온도 분포에는 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

4.3.2 복사불쾌적 평가

복사 난방 패널이 외주부에 적용되어 방열할 때의 radiant asymmetry의

결과를 살펴보면, 대부분의 경우에서 radiant asymmetry temperature가 기준보다 낮게 나타났다. 특히, 복사 난방 패널이 외주부에 적용될 때 좁은 면적에 높은 표면 온도로 적용될 경우에는 radiant asymmetry가 심하게 나타날 것으로 판단되었으나 시뮬레이션 결과는 예상과 일치하지 않았다. 이러한 결과는 복사 난방 패널의 경우 높은 온도로 적용되었다 할지라도 적용되는 방열 면적이 넓지 않고 차가운 창문 부근에 설치되었기 때문에 차가운 창문과 따뜻한 복사 난방 패널의 영향을 동시에 받으므로 패널의 높은 온도로 인한 불쾌감이 상쇄되었다고 볼 수 있으며, 또한 천장 복사 난방 패널의 경우에는 천장면이 view factor가 작기 때문에 온도가 높더라도 재실자와 패널간의 복사열교환 효과가 크지 않기 때문에 radiant asymmetry로 인한 재실자의 불쾌감이 발생하지 않았다고 판단된다.

또한 radiant asymmetry temperature 결과 복사 난방 패널의 방열량이 같은 경우에는 radiant asymmetry temperature가 유사하게 (특히 천장 복사 난방 패널의 경우에는 거의 똑같이) 나타났다. 이는 복사 불쾌적은 온도만의 문제가 아니라 온도와 그에 따른 방열면의 면적이 중요한 요소로 작용하기 때문에 이를 평가할 경우 단순히 온도차이로만 평가할 것이 아니라 온도와 방열면의 면적도 같이 고려하여 평가해야 함을 의미한다.

이와 같은 시뮬레이션 결과로 보면, radiant asymmetry temperature를 통한 재실자의 복사열쾌적 관점에서는 복사 난방 패널의 온도가 높더라도 그에 따라 면적이 작아지기 때문에 이와 같은 조건으로 적용을 하더라도 복사 불쾌적을 유발하지는 않는다고 볼 수 있다. 다만, 이렇게 적용할 경우에는 복사 난방 패널의 단위면적당 방열량이 높아지기 때문에 복사 난방 패널의 효율성이나 경제성 등을 고려하였을 때는 적절하지 않을 수도 있으므로 이러한 결과는 열쾌적성 관점에서의 참고자료의 수준으로만 제시하고자 한다.

4.3.3 복사 난방과 대류 난방의 열쾌적성 비교 평가

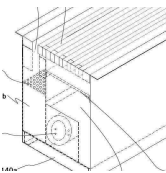
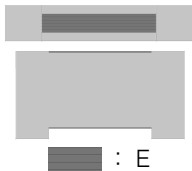

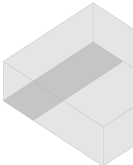
복사 난방 패널과 기존에 건물 외주부에 적용되어온 대류 난방과의 열쾌적성에 대한 비교 평가를 위하여 건물 외주부에서의 열적 특성에 따라 분류된 외주부 시스템 중에서 대류 난방을 활용하는 대표적인 시스템인 Air barrier system과 Fan coil unit (FCU)을 선정하였다. 그리고 선정된 시스템이 적용된 사례를 분석하여 시뮬레이션 입력값으로 설정하였다.


대류 난방과 복사 난방 패널의 공급 열량은 제거해야 할 난방 부하만큼 열을 공급하며, 외주부에 적용되는 시스템을 통하여 실에 발생하는 난방부하 전체를 제거하는 것으로 가정하였다. 여기서 실의 난방부하는 창문을 통한 열손실 및 침기만 있는 것으로 가정하였으며, 건물 외주부에서의 열적 불쾌적의 발생가능성이 높은 상황을 가정하기 위해 일사의 영향은 고려하지 않았다. 두 시스템 유형간의 비교 평가는 강제대류 시스템과 자연대류 시스템간의 비교 평가라 할 수 있는데, 강제대류 시스템의 경우, 내부발열의 영향을 거의 받지 않으므로 본 평가에서는 시스템간의 비교평가에 초점을 맞추기 위해 내부발열의 영향은 고려하지 않았다. 그리고 건물 외주부에서 downdraft 및 cold radiation effect가 가장 쉽게 발생할 수 있는 혹독한 실외 환경을 가정하여 평가하였다. 즉, 건물 외주부에서의 열적 불쾌적의 발생가능성이 높은 상황에서 건물 외주부 시스템을 적용하였을 때의 열적 불쾌적성을 분석하면, 이보다 좋은 상황에는 불쾌적이 발생하지 않을 것이라고 가정하였다.

Air barrier system은 perimeter-less 시스템의 한 종류로 Line diffuser의 supply와 exhaust를 모사 즉, 창문 바닥부분에서 바람을 송출하고 창문 위에서 빠져나가도록 모델링하여 이 때 창문을 타고 흘러가는 기류가 외부의

차가운 기류를 차단할 수 있도록 하였다. 그리고 FCU의 경우에는 취출구를 모사하여 FCU의 필요 방열량에 따라 풍속과 취출온도를 계산하여 취출구에 풍속과 이때의 온도를 입력값으로 설정하였다. 이와 같은 각 시스템별 시뮬레이션 평가 조건은 <Table 4.12>와 같다.

<Table 4.12> System assessment conditions

Index	System	Model	Input value						
			Size [m ²]		Heat area (supply area) [m ²]	Heating conditions			Thermal output [W]
						Temp [°C]	Velocity [m/s]	air volume [m ³ /h]	
G_(1)	Air barrier system		Line diffuser	S	0.192 (0.02 x 1.2 m) x 8	21.8	1.77	608 (76 x8)	1332.35
		E		0.192 (0.02 x 1.2 m) x 8					
G_(2)	FCU	 : E	0.166 (1.18 x 0.23 x 0.61) (W x D x H)		0.828	22.6	2.27	678	
A_(6)	Radiant ceiling heating system		16.20 (8.1 x 2) (W x D)			33.71	—	—	
B_(6)	Radiant floor heating system		16.20 (8.1 x 2) (W x D)			27.53	—	—	

S : Supply / E : Exhaust / W : Width / D : Depth / H : Height
 : Heating surface area of radiant heating panel

열쾌적성 비교 평가는 실내 온열 환경 분포를 통하여 수직온도편차가 재실자의 불쾌감을 유발하지 않는지, 복사 난방 패널이 적용된 경우에는 천장 및 바닥의 온도가 불쾌감을 유발하지 않는지 평가하였다. 그리고 실내 기류의 분포를 통하여 평가 대상 시스템이 차가운 기류의 흐름을 저감하여 재실자의 쾌적성을 만족시켰는지, 또는 강제 대류 시스템의 경우 차가운 기류의 흐름을 막기 위해 토출된 기류가 오히려 불쾌감을 유발하지는 않았는지에 대해 draft rate 지표로 검토하였다.

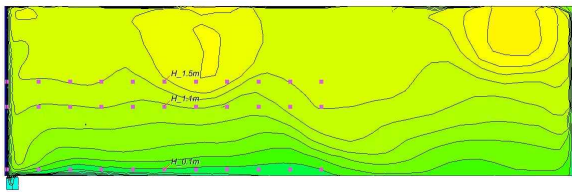
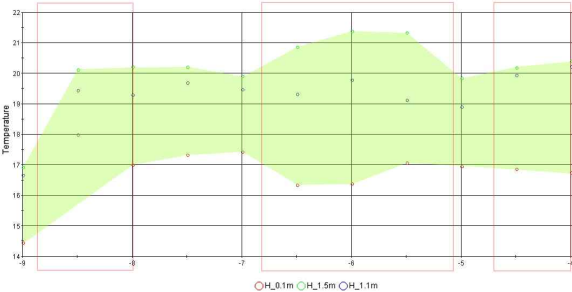
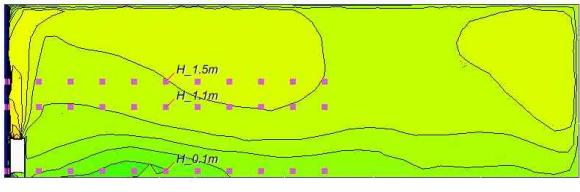
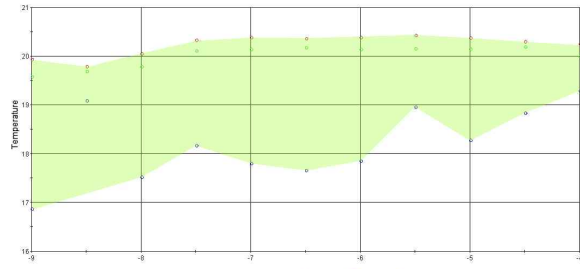
시뮬레이션 결과에 대한 상세 내용은 다음과 같다.

(1) 실내 온열 환경 분포

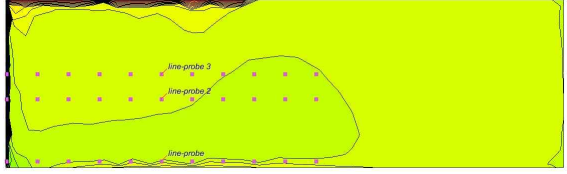
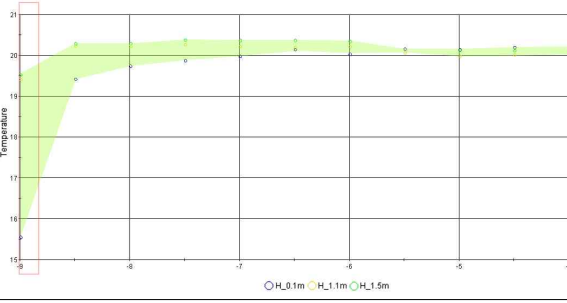
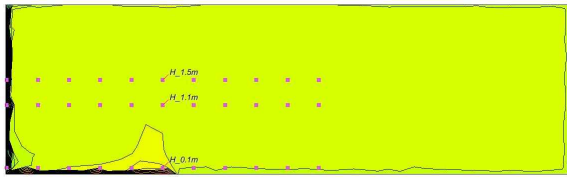
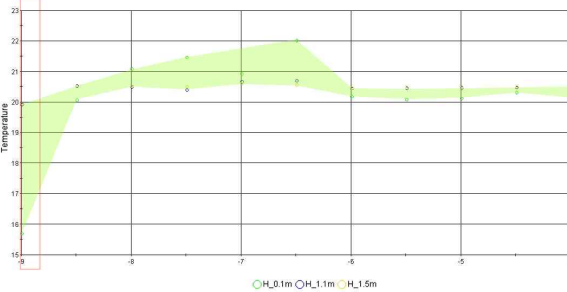
외주부 시스템의 적용 케이스에 따라 발목 높이(0.1m)와 앉은 자세에서의 머리 위치(1.1m), 선 자세에서의 머리 위치(1.5m)의 온도값으로 Comfort Class A의 기준인 수직 온도차 3℃ 이상이 나타나는 부분을 도출하였다. 이와 같은 실내 온열 환경 분포는 <Table 4.13>과 같다.

Air barrier system의 경우에는 바닥면에 가까운 부근에서의 온도는 실의 설정온도보다 낮고 천장면에 가까운 부근의 온도는 상대적으로 높아서 창문 근처 및 재실 영역 부근에서 수직 온도차가 3℃ 넘는 부분이 다수 발생하였다. 이는 Air barrier system이 창문 측에서의 차가운 공기를 사전에 충분히 차단하지 못하여 창문 근처의 공기가 냉각되고 하강하여 재실영역 뿐만이 아니라 실의 깊숙한 부분까지 유입된 것으로 판단되며, 이에 따라 바닥면 부근에서의 온도와 천장면 부근에서의 높은 온도차가 발생하였다. 이러한 온도차는 재실자의 불쾌적을 유발할 수 있으며, Air barrier system의 경우 재실자의 쾌적성을 위해서는 난방부하에 따라 요구되는 열량보다 더 많은 열을 공급해야 할 필요도 있다.

<Table 4.13> Temperature distribution

Index	System	Temperature distribution		Legend
G_(1)	Air barrier system	Indoor temp.		Temperature[°C] 27.00 23.00 19.00 15.00 11.00 7.00
		Vertical temp.		○H_0.1m ○H_1.5m ○H_1.1m : ΔT exceed 3°C
G_(2)	FCU	Indoor temp.		Temperature[°C] 27.00 23.00 19.00 15.00 11.00 7.00
		Vertical temp.		○H_0.1m ○H_1.5m ○H_1.1m : ΔT exceed 3°C

<Table 4.13> Temperature distribution – continued

Index	System	Temperature distribution		Legend
A_(6)	Radiant ceiling heating system	Indoor temp.		Temperature[°C] 27.00 23.00 19.00 15.00 11.00 7.00
		Vertical temp.		○H_0.1m ○H_1.5m ○H_1.1m □ : ΔT exceed 3°C
B_(6)	Radiant floor heating system	Indoor temp.		Temperature[°C] 27.00 23.00 19.00 15.00 11.00 7.00
		Vertical temp.		○H_0.1m ○H_1.5m ○H_1.1m □ : ΔT exceed 3°C

Radiant ceiling heating panel과 Radiant floor heating panel의 경우에도 창문 부근에서는 수직 온도차가 3℃를 넘었는데 이는 복사 난방 패널의 자연 대류 원리를 통한 열공급으로 창문 측의 차가운 공기를 즉각적으로 가열

하지 못한 결과로 판단된다. 그러나 재실영역 부근에서는 수직 온도차가 재실자의 불쾌적을 유발하는 수준으로 나타내지 않았으므로, 온도 분포를 통한 실내 온열 환경 평가에서는 재실자의 쾌적성을 만족시켰다고 판단된다.

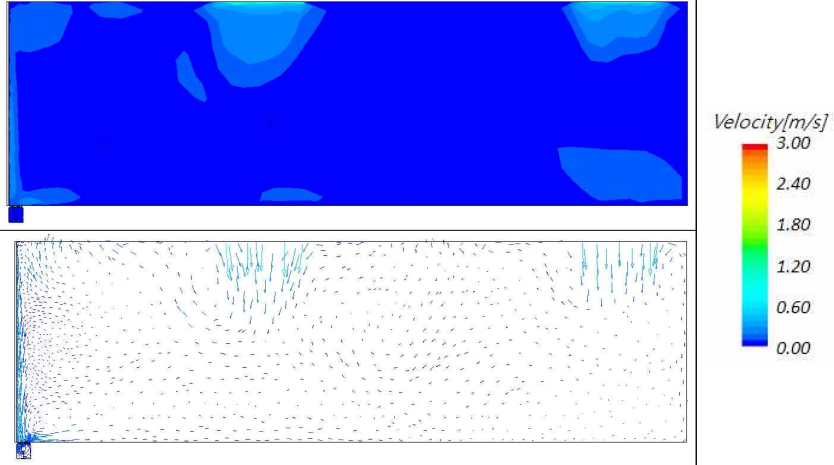
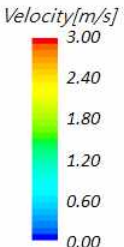
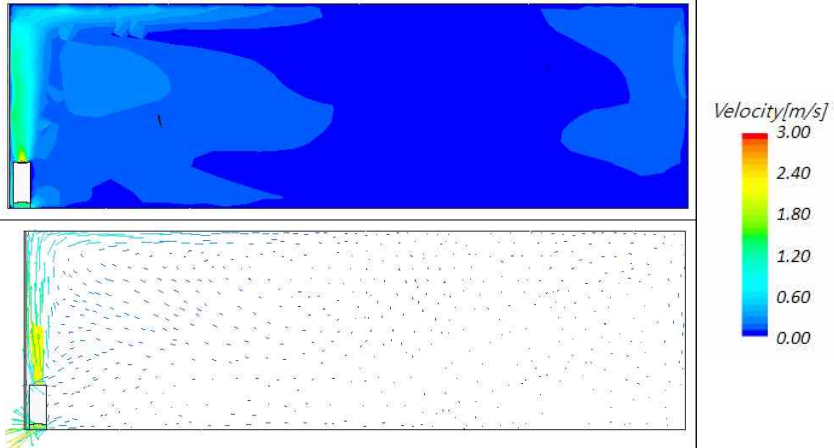
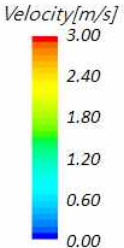
한편 FCU의 경우에는 강제대류를 통한 열공급으로 창문 근처의 차가운 기류가 충분한 열을 공급하여 수직 온도차가 3℃ 넘는 부분은 발생하지 않았다. 그러나 수직 온도차가 3℃를 넘는 부분이 없을 뿐이지, 창문 근처에서 재실영역 부근까지 수직 온도차가 3℃에 가까운 부분이 다수 발생하였으며, Air barrier system과 마찬가지로 바닥면 부근은 상대적으로 온도가 낮고 천장면 부근은 상대적으로 온도가 높은 온도 성층 현상이 발생하였다. 이는 재실자의 불쾌적을 유발할 수 있는 가능성이 높으므로 재실자의 쾌적성을 만족시켰다고 판단하기에는 무리가 있으며, 향후 열쾌적 지표를 통한 추가 평가가 필요하다.

(2) 실내 기류 분포

외주부 시스템 및 복사난방 패널의 적용에 따른 실내 기류 속도를 도출하여 시스템 적용시의 기류 흐름을 분석하였다. 시스템별 실내 기류 분포 결과는 <Table 4.14>와 같다.

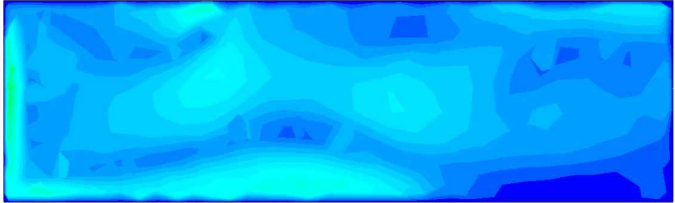
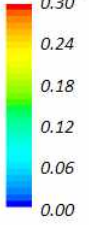
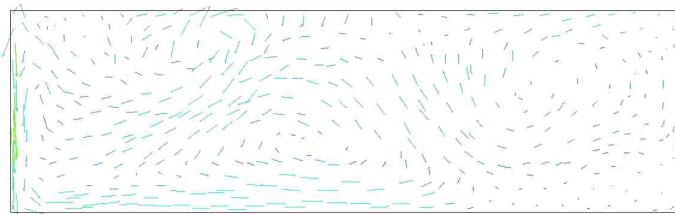

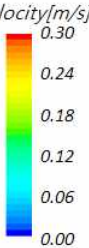
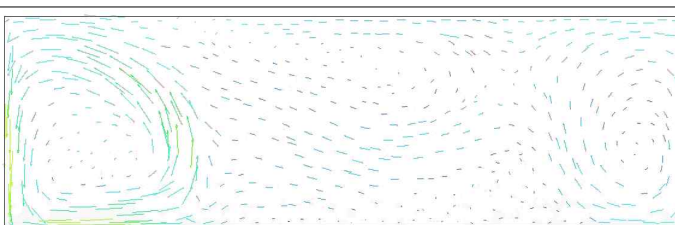
기류 속도의 절대값으로만 판단하였을 때, FCU를 제외한 모든 시스템이 기준치를 만족하는 결과를 나타냈다. FCU의 경우에도 수직면으로 방출되는 높은 기류 속도로 인하여 재실영역으로 기준치를 초과하는 기류 속도가 나타나기도 하지만, 이러한 기류 속도로 인하여 재실자가 불쾌감을 느낄 수 있는지에 대해서는 향후 draft rate과 같은 기류로 인한 열적 불쾌감을 판단할 수 있는 지표로 평가할 수 필요가 있다. 오히려 기류 분포에서 유의해서 살펴봐야 하는 결과는 Radiant floor heating system의 결과라 할 수 있다.

<Table 4.14> Velocity profiles

Index	System	Velocity profiles	Legend
G_(1)	Air barrier system		
G_(2)	FCU		

Radiant floor heating system의 기류 분포 결과를 보면, 앞서 복사 난방 패널의 열쾌적성에 평가한 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 차가운 창문에서 하강하는 차가운 공기와 바닥에서 발생하는 따뜻한 공기 사이의 온도차이가 크게 나타나고 천장면을 타고 창문 근처로 유입된 기류의 영향까지 받아서 바닥면 근처에서의 기류 속도가 높게 분포하였다.

<Table 4.14> Velocity profiles – continued

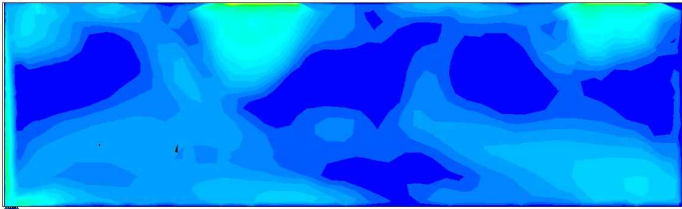
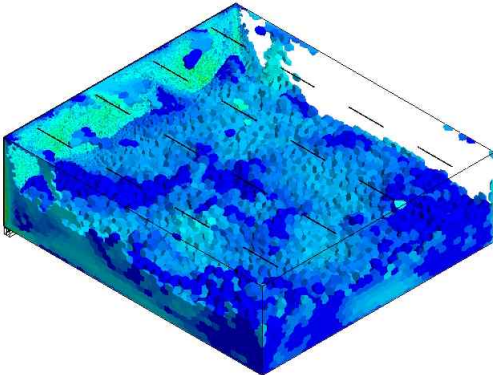
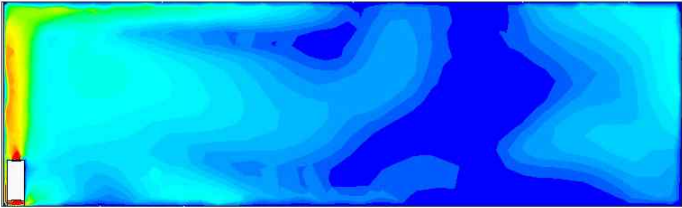
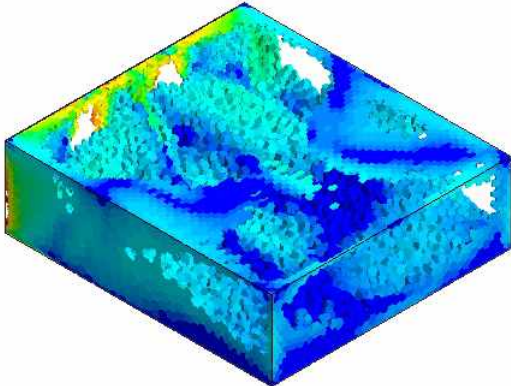
Index	System	Velocity profiles	Legend
A_(6)	Radiant ceiling heating system		<p>Velocity[m/s]</p> 
			
B_(6)	Radiant floor heating system		<p>Velocity[m/s]</p> 
			

(3) 열쾌적성 평가

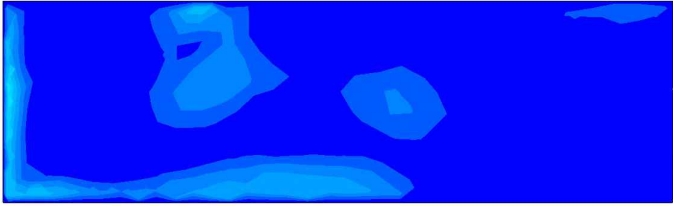
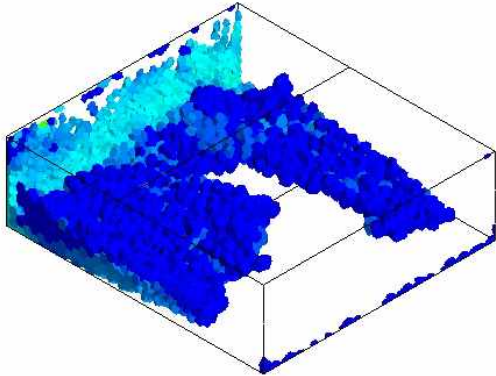
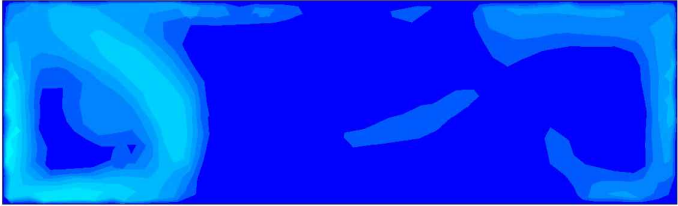
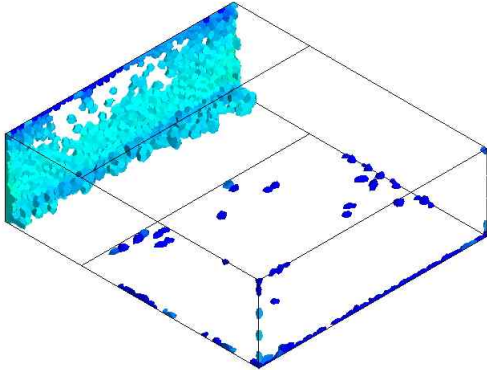
앞서 도출된 실내 온도 및 기류 분포를 바탕으로 draft rate을 계산하여 재실자의 열쾌적성을 평가하였으며, 평가 결과는 <Table 4.15>와 같다.

Air barrier system의 결과를 살펴보면, 창문 근처 및 재실 영역에서 전체적으로 기준치를 만족하는 draft rate의 분포를 나타내었지만, 다른 시스템과 비교해봤을 때는 전체적으로 draft rate의 수치가 높게 나타났다.

<Table 4.15> Draft rate distribution

Index	System	Draft rate distribution	Legend
G_(1)	Air barrier system		<p>Draft Rate 50.00 이상 40.00 30.00 20.00 10.00 0.00</p>
			
G_(2)	FCU		<p>Draft Rate 50.00 이상 40.00 30.00 20.00 10.00 0.00</p>
			

<Table 4.15> Draft rate distribution – continued

Index	System	Draft rate distribution	Legend
A_(6)	Radiant ceiling heating system		<p>Draft Rate 50.00 이/상 40.00 30.00 20.00 10.00 0.00</p>
			
B_(6)	Radiant floor heating system		<p>Draft Rate 50.00 이/상 40.00 30.00 20.00 10.00 0.00</p>
			

특히 바닥면 및 천장면에서는 기준치에 가까운 draft rate의 수치를 보이기도 하였다. 이는 Air barrier system을 실제 적용하였을 경우, 실내 온도 분포가 성층화되어 나타난 결과를 고려하였을 때 재실자의 불쾌적을 유발할 가능성이 높다고 볼 수도 있다.

FCU의 경우에는 취출구에서의 높은 draft rate은 강제 대류 시스템의 특성이며 재실자의 불쾌적을 유발하지 않는다고 볼 수 있지만, FCU에서 공급하는 열량이 FCU가 배치되지 않은 부분에서의 차가운 기류와 혼합되지 못하기 때문에 이 부분에서의 차가운 기류 흐름은 차단하지 못하며, 이러한 기류가 실내로 유입되어 draft rate의 수치가 기준치를 초과하는 부분이 발생하게 되었으며, FCU의 외주부 적용을 통한 재실자의 열쾌적성 향상 가능성에는 의문이 제기된다.

Radiant ceiling heating panel과 Radiant floor heating panel의 경우에는 창문 아래쪽에서 높은 draft rate의 값을 보이지만 기류가 실내로 유입될수록 기류 속도는 낮아지고 실내온도는 높아져서 draft rate의 값이 점점 작아지는 경향을 보인다. 특히, Radiant floor heating system의 경우 창문 측으로의 기류 유인 현상으로 인해 기류 속도가 상대적으로 높아지고 이로 인해 재실자의 불쾌적이 우려되었으나, 창문 측의 차가운 공기를 재실자의 불쾌적을 유발하지 않는 수준으로 열을 공급하여 바닥 근처 공기의 온도가 높게 형성되었기 때문에 draft rate 수치는 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 복사 난방 패널의 적용 시에는 적절한 방열면적 및 표면온도를 통해 자연대류 혼합 흐름과 기류의 유인 현상을 저감하여야 한다.

이와 같이 실내 온열환경 분포 및 기류 속도, 열쾌적성을 종합해서 판단해 볼 때, 복사 난방 패널이 대류 난방 방식의 기존 외주부 시스템보다 우수한 열적 쾌적성을 나타낸다고 판단할 수 있다.

4.4 소결

본 장에서는 건물 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 이를 위해 우선, 다양하게 나타나는 외부 환경을 일반적인 기준에 따라 적용할 수 있도록 창문의 실내측 표면 온도를 기준으로 외부 환경의 범위를 설정하였으며, 이에 따라 복사 난방 패널의 방열량을 산출하고 적용 가능한 복사 난방 패널의 방열 범위를 제시하였다. 그리고 복사 난방 패널의 적용 시 쾌적성에 영향을 줄 수 있는 패널의 설계 요소 및 건물의 실내외 환경 요소를 도출하고 방열 조건 설정 프로세스를 제시하였다. 이에 따라 건물의 실내외 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 case를 선정하였으며, 시뮬레이션 결과를 열쾌적성을 평가할 수 있는 지점 및 지표에 따라 분석하였다. 또한 복사 난방 패널이 건물 외주부의 열쾌적성 확보를 위해 적용할 수 있는 가장 이상적인 시스템이라는 가정에 대해 기존의 외주부 시스템을 대상으로 열쾌적성을 비교 평가하여 검증하였다.

- 1) 복사 난방 패널이 건물 외주부에 적용되는 경우의 외부 환경은 다양하게 나타날 수 있으므로 본 연구에서의 시뮬레이션 case에 해당되지 않는 조건에서의 열쾌적성 평가 결과와 그때 복사 난방 패널의 방열 조건에 대해서도 예측할 수 있도록 외부 환경 조건을 창문의 실내측 내 표면 온도를 통하여 범위를 설정하고 계산할 수 있도록 하였다. 그리고 복사 난방 패널이 건물의 난방 부하를 처리할 수 있도록 방열량을 설정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 또한 패널의 방열량에 따라 허용 가능한 표면 온도를 산정하여 패널의 방열 범위를 설정하였다.

- 2) 건물 외주부에 복사 난방 패널을 적용하기 위해서는 건물의 실을 기준으로 즉, 재실자의 쾌적성을 기준으로 하여 이에 영향을 주는 모든 요소를 고려하여 적절한 방열 조건을 설정해야 한다. 따라서 외부 환경의 영향을 반영하는 창문과 이에 따른 복사 난방 패널의 적정 방열 조건을 도출하고, 건물의 실내 환경 요소 및 이를 냉방 부하로 판단했을 때 적용되는 복사 냉방 패널에 따라 복사 난방 패널의 방열 조건이 어떻게 달라질 수 있는지 분석해야 한다. 그리고 부하에 영향을 미치지 않지만 차가운 기류의 흐름을 차단할 수 있는 요소도 고려하였을 때, 복사 난방 패널의 최적 방열 조건을 제시할 수 있다.
- 3) 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가결과, 외부 환경 조건의 기준이 완화될수록 복사 난방 패널에 요구되는 방열량 줄어들지만 그에 따라 창문의 내표면 온도와 패널의 표면온도와의 차이가 줄어들어 재실영역으로 유입되는 draft rate 수치가 저감되고 decay ratio가 높았졌다. 이러한 경향은 패널의 방열면적 변화에 따른 열쾌적성 평가결과에도 유사하게 나타났는데, 외부 환경 조건이 혹독한 경우에는 창문 근처에서 높은 표면 온도로 열을 공급해야 decay ratio를 증가시켜 재실영역으로 유입되는 차가운 기류를 차단할 수 있지만 외부 환경 조건이 완화될수록 draft rate의 height가 낮아져서 패널의 방열면적을 넓게 하여도 decay ratio가 낮게 나타났다. 그리고 복사 난방 패널의 배치 위치에 따른 decay ratio 값과 radiant temperature asymmetry를 비교해봤을 때, 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 천장에 적용하는 것이 downdraft의 저감 및 복사불쾌적의 방지를 위해 유리할 것으로 판단된다.

4) 복사 난방 패널이 외주부에 적용된 경우, 내부 발열의 영향을 받게 되면, 내부 발열 요소가 하나의 발열체로서의 역할을 하게 된다. 이에 따라 내부 발열로 인한 발생된 기류가 천장면으로 타고 창문 측으로 유입되어 기류의 속도를 상승시켜 차가운 기류의 흐름을 증폭시키는 효과보다 실에 열을 공급해주고 차가운 공기를 가열시키는 효과가 더 크게 나타나서 채실자의 쾌적성에 긍정적으로 작용한다고 볼 수 있다. 그리고 내부 발열의 영향을 클수록 외부 환경 조건이나 복사 난방 패널의 적용에 상관없이 decay ratio가 높게 나타나 downdraft로 인한 불쾌감을 저감할 가능성도 높다. 따라서 건물에 내부 발열이 있을 경우, 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성은 더 높다고 할 수 있다. 또한 복사 난방 패널의 높은 방열면 온도로 인해 복사불쾌적의 문제도 발생하지 않았다. 이는 복사불쾌적은 온도만의 문제가 아니라 온도와 그에 따른 방열면의 면적이 중요한 요소로 작용한 결과로 볼 수 있는데, 복사 난방 패널은 높은 온도로 적용되더라도 이때의 방열면적이 좁기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

5) 대류 난방 방식을 활용하는 기존의 외주부 시스템과 복사 난방 패널의 열쾌적성을 비교 평가한 결과, 복사 난방 패널의 경우에는 자연 대류를 통한 열공급 효과로 실내 온도를 균일하게 유지하고 차가운 창문으로 인한 기류 흐름을 저감하기에 충분한 열을 공급하여 강제 대류를 이용하는 기존의 외부주 시스템에 비해 열쾌적성이 우수한 것으로 나타났다. Air barrier system과 FCU의 경우에는 창문 근처에서 채실영역 부근까지 수직 온도차가 3℃에 가까운 부분이 다수 발생하여 채실자의 불쾌감을 유발할 수 있는 가능성이 높으며, 이는 draft rate의 수치에도

반영되어 복사 난방 패널과 비교하였을 때 상대적으로 기준 범위를 초과하는 지점이 다수 발생하였다. 다만, 바닥 복사 난방의 경우 방열 온도와 창문 측 공기와의 온도차가 높아서 창문 측으로의 기류 유인 현상으로 인해 기류 속도가 상대적으로 높아지고 이로 인해 재실자의 불쾌적이 발생할 수 있다.

제 5 장 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건 설정

5.1 열쾌적성을 고려한 복사 난방 패널의 외주부 적정 방열 범위

5.2 건물의 실내외 환경 요소에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건

5.3 소결

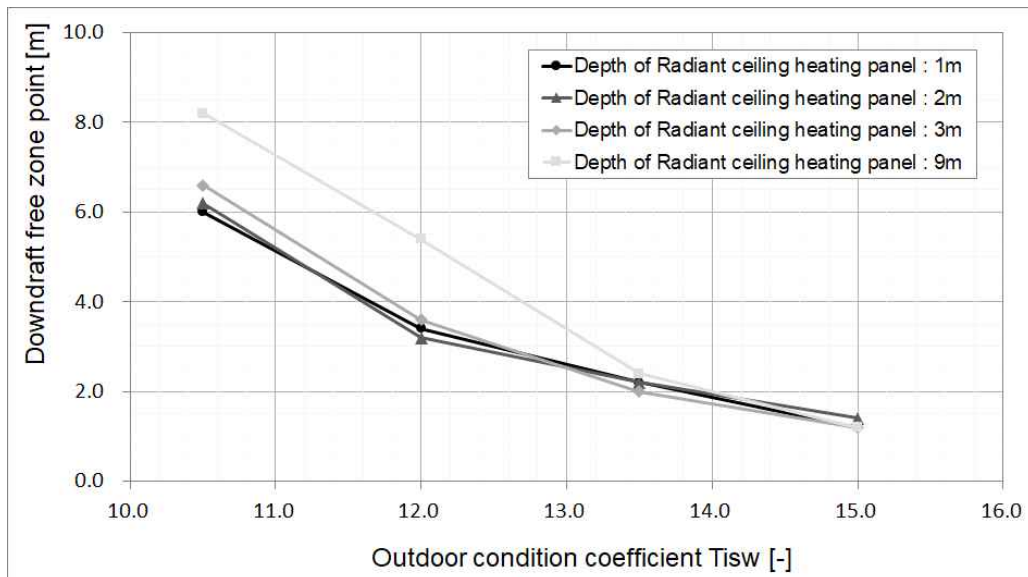
복사 난방 패널의 외주부 적용을 위해서는 열쾌적성에 영향을 주는 건물의 실내외 환경 조건에서 복사 난방 패널의 부하 제거를 위한 방열량만으로 재실자의 쾌적성을 확보할 수 있어야 한다. 여기서 건물의 실내외 환경 조건은 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가 요소가 되며, 부하 제거를 위한 방열량은 복사 난방 패널의 방열 조건이 된다. 따라서 열쾌적성 평가 시뮬레이션 결과를 바탕으로 건물의 실내외 환경 요소의 영향에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 도출하고, 제시된 방열 조건 중 열쾌적성이 가장 높은 조건을 제시해야 한다.

이에 본 장에서는 앞서 도출된 건물의 실내외 환경 요소와 복사 난방 패널의 설계 요소를 바탕으로 각각의 요소들이 재실자의 열쾌적성에 어떤 영향을 주고 이에 따라 복사 난방 패널의 방열 조건을 어떻게 설정할 수 있는지 열쾌적성 평가 시뮬레이션 결과를 바탕으로 도출하였다. 복사 난방 패널의 방열 조건은 외부 환경 조건과 복사 난방 패널간의 관계성을 기본으로 내부 발열 및 복사 냉방 패널의 영향을 추가적으로 반영할 수 있도록 하였으며, 최종적으로 열쾌적성 관점에서 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성을 판단할 수 있는 방열 조건 차트와 예측식 및 보정계수를 제시하였다.

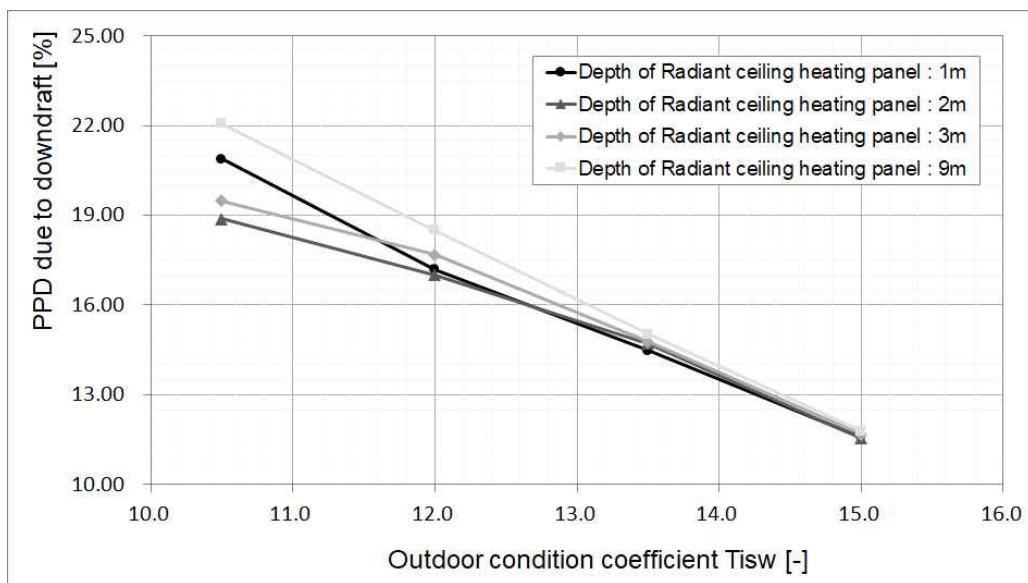
5.1 열쾌적성을 고려한 복사 난방 패널의 외주부 적정 방열 범위

복사 난방 패널의 방열 조건은 외부 환경 조건에 따른 난방 부하에 따라 결정되며, 내부 발열 등과 같은 요소까지 고려하면 냉방 부하를 어떻게 처리할지에 따라 달라질 수 있지만 난방 부하를 처리할 수 있는 방열 조건을 기본으로 한다. 이러한 패널의 방열 조건은 방열 면적 및 표면 온도에 따라 결정되므로 이에 따른 재실자의 열쾌적성을 일반화된 데이터로 제시해 주어야 한다. 재실자의 열쾌적성은 공기의 온도 및 기류속도의 함수로서 공기의 온도가 높을수록 기류속도가 낮을수록 재실자의 쾌적성이 향상될 수 있다. 복사 난방 패널의 방열시 높은 표면온도로 열을 공급하는 것이 유리할 수 있으나 패널의 표면온도가 높으면 창문 내표면 온도와 차이가 커져 기류속도를 증가시킴에 따라 열쾌적성에 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 패널의 표면온도와 창문의 내표면 온도와 관계에 따라 재실자의 열쾌적성을 확보할 수 있는 적정 방열 범위가 제시되어야 한다. 이에 본 절에서는 패널의 적정 방열 범위의 도출 방법을 분석하여 향후 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건을 제시할 수 있는 방향성을 설정하고자 한다.

앞선 열쾌적성 평가 시뮬레이션 결과에 따르면, 건물의 실내요소인 내부 발열이나 복사 난방 패널의 적용 등은 재실자의 열쾌적성에 긍정적으로 영향을 미친다. 따라서 외부 환경 조건과 복사 난방 패널의 방열 조건간의 관계가 기본이 된다고 할 수 있으므로 외부 환경의 영향을 받는 차가운 창문과 복사 난방 패널의 방열 조건과의 관계성을 분석하였다. 천장 복사 난방 패널이 적용된 공간에서 downdraft의 발생하지 않았다고 판단되는 지점은 [Figure 5.1]과 같으며, 재실영역 시작 지점인 창문을 기준으로 1m 떨어진 지점에서의 draft rate 분포는 [Figure 5.2]와 같다.



[Figure 5.1] The relationship between ceiling panel and outdoor conditions (the point when the draft rate falls below class A)

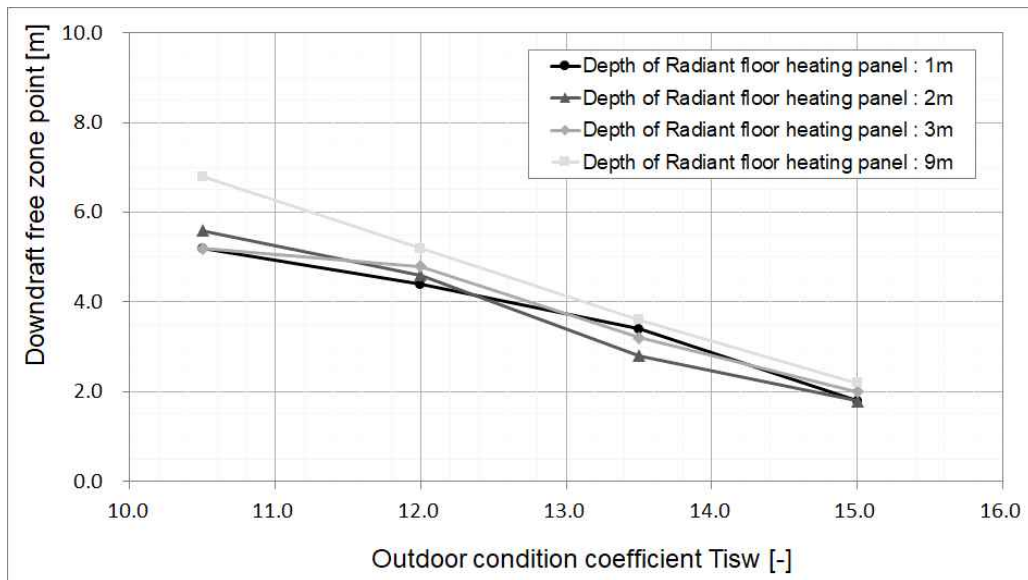


[Figure 5.2] The relationship between ceiling panel and outdoor conditions (the point when the occupation area is starting)

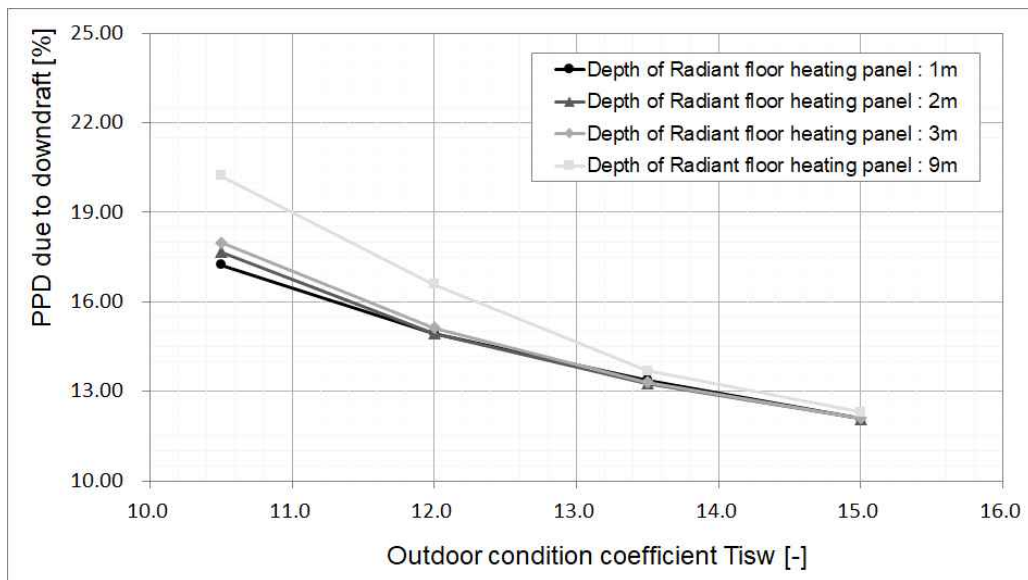
외부 환경 조건에 상관없이 천장 복사 난방 패널을 부분적으로 적용하는 것이 열쾌적성 관점에서 유리하며, 외부 환경 조건이 보통 수준 정도로 확보가 되면 천장 복사 난방 패널을 천장면 전체에 적용하는 것도 가능하다. 그러나 천장 복사 난방 패널의 방열 면적에 따른 비교는 상대적 평가일 뿐 외부 환경 조건이 혹독한 경우에는 창문 근처에서의 downdraft 수치가 높게 나타나서 downdraft로 인한 재실자의 불쾌감이 기준점 이하라고 판단할 수 있는 downdraft free zone이 재실영역 시작점을 기준으로 실의 안쪽 깊은 부분에서 나타났다. 이는 천장 복사 난방 패널의 경우, 천장면에서 방출하는 따뜻한 기류가 창문에서 발생하는 하강기류를 증폭시켜서 기류 속도를 상승시키고 이로 인해 downdraft의 발생을 심화시킬 수 있지만, 창문 근처의 차가운 기류에 충분한 열을 공급하면 기류 속도가 상승하더라도 차가운 기류가 하강하는 것이 아니라 상대적으로 덜 차갑거나 따뜻한 기류가 하강하여 재실영역으로 유입되게 되므로 유입된 기류로 인해서 재실자가 불쾌감을 느끼지 않게 되는 결과라고 할 수 있다.

따라서 천장 복사 난방 패널의 경우에는 상대적으로 높은 표면온도로 천장면에서의 방열을 통해서 창문 근처에 있는 공기를 가열해줄 수 있는 지점이 천장 복사 난방 패널의 적정 방열 범위라 할 수 있으며, 이를 위해 좁은 면적, 높은 표면온도에서 방열 면적을 점점 상승시키는 방향으로 방열 조건을 설정하는 것이 유리하다.

한편, 바닥 복사 난방 패널이 적용된 공간에서 천장 복사 난방 패널과 마찬가지로 Class A의 쾌적 범위를 기준으로 하였을 때, downdraft의 발생하지 않았다고 판단되는 지점은 [Figure 5.3]과 같으며, 재실영역 시작 지점인 창문을 기준으로 1m 떨어진 지점에서의 draft rate 분포는 [Figure 5.4]와 같다.



[Figure 5.3] The relationship between floor panel and outdoor conditions (the point when the draft rate falls below class A)



[Figure 5.4] The relationship between floor panel and outdoor conditions (the point when the occupation area is starting)

외부 환경 조건이 혹독할 경우, downdraft의 발생을 억제하기 위해서는 바닥 복사 난방 패널을 부분적으로 적용하는 것이 유리하나, 외부 환경 조건이 보통 수준만 되면, 바닥면 전체에 적용하는 것이 효과적이다. 왜냐하면, 바닥 복사 난방 패널을 부분적으로 적용할 경우에는 상승한 공기가 천장면을 타고 흘러내려가는 천장효과로 인하여 하강기류가 증폭되는데, 창문의 단열성능이 일반적인 경우에는 이러한 하강기류를 차단하지 못하지만, 창문의 단열성능이 향상된 경우에는 천장효과를 줄이는 동시에 하강기류가 재실영역으로 유입되는 것을 차단할 수 있기 때문이다.

따라서 바닥 복사 난방 패널은 좁은 면적에서 방열할 경우, 천장효과로 인해 downdraft가 심화될 수 있고, 넓은 면적에서 방열할 경우 하강 기류를 막지 못하므로 이와 같은 두 가지 현상을 발생시키지 않는 좁은 면적과 넓은 면적 지점 사이가 적정 방열 범위라 할 수 있으므로 마찬가지로 좁은 면적, 높은 표면온도에서 방열 면적을 점차 증가시키는 방향으로 방열 조건을 설정하는 것이 유리하다.

이와 같은 현상을 기본으로 하여, 재실자의 쾌적성을 기준으로 이에 영향을 주는 모든 요소를 고려하여 복사 난방 패널의 방열 조건을 설정하고자 한다. 즉, 본 절에서 제시된 복사 난방 패널의 방열 조건 설정 방법을 기본으로 하여 외부 환경의 영향, 내부 방열 및 복사 냉방 패널의 적용과 같이 복사 난방 패널이 적용된 실에서 재실자의 쾌적성에서 영향을 줄 수 있는 모든 요소가 고려된 열쾌적성 평가를 분석하여, 창문과 복사 난방 패널과의 관계를 기본으로 한 방열 조건을 설정하고 건물의 실내환경 요소가 반영되었을 경우 기본 방열 조건과 다르게 나타나는 열쾌적성 양상을 도출하고 이에 따른 적정 방열 범위를 제시하고자 한다. 이와 같은 과정을 통하여 도출된 결과가 복사 난방 패널의 최적 방열 조건이라 할 수 있을 것이다.

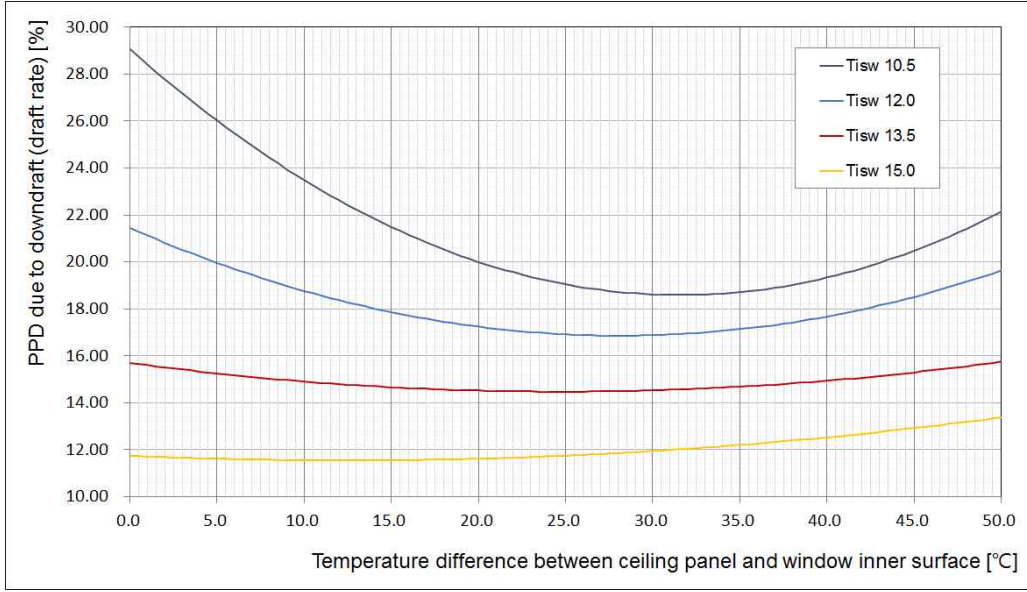
5.2 건물의 실내외 환경 요소에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건

복사 난방 패널을 외주부에 적용하고자 할 때, 앞서 제시하였듯이 표면 온도를 높게 하면 방열 면적을 좁게 적용할 수 있고 반대로 표면 온도를 낮게 하면 상대적으로 방열 면적을 넓혀야 한다. 또한 표면 온도가 높을수록, 난방 부하값이 클수록 패널과 창문 사이의 온도차가 커져 기류 속도가 증폭되며 이에 따라 downdraft의 발생 가능성이 높아진다. 그렇지만, 표면 온도와 방열 면적은 난방 부하값이 작을수록 각각의 값이 점점 작아지게 된다. 따라서 창문의 내표면 대표온도값과 복사 난방 패널의 표면 온도와의 관계를 기본으로 방열 조건이 설계되어야 한다.

그리고 외주부에 적용되는 복사 난방 패널의 열쾌적성을 확보할 수 있는 방열 조건을 제시하는 것이 방열량 차트의 목적이므로, 이를 위해 차트 내에서 열쾌적성에 대해 확인할 수 있도록 재실영역이 시작되는 1m 지점에서의 draft rate과 draft rate이 열쾌적성 평가 기준값(본 연구에서는 Class A를 기준으로 설정하였다) 이하가 되는 시작 지점 그리고 창문의 내표면 대표온도값과 복사 난방 패널의 표면 온도 변화에 따른 쾌적 확보 지점 및 decay value를 외부 환경 조건의 영향, 내부 발열 및 복사 난방 패널 적용에 따른 영향의 순서로 제시하였다.

5.2.1 외부 환경 조건에 따른 패널의 방열 조건 및 예측식

외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 천장 복사 난방 패널과 바닥 복사 난방 패널로 구분하여 [Figure 5.5], [Figure 5.6]과 같이 제시하였으며, 예측식 및 보정 계수는 식 (5.1)~ (5.16)과 같다.



[Figure 5.5] Draft rate by thermal output conditions of ceiling panel

$$DR = 0.0105\Delta t^2 - 0.6635\Delta t + 29.074 \quad (R^2 = 0.9931) \quad T_{isw} 10.5 \quad (5.1)$$

$$DR = 0.058\Delta t^2 - 0.3264\Delta t + 21.453 \quad (R^2 = 0.9820) \quad T_{isw} 12.0 \quad (5.2)$$

$$DR = 0.002\Delta t^2 - 0.0989\Delta t + 15.698 \quad (R^2 = 0.9812) \quad T_{isw} 13.5 \quad (5.3)$$

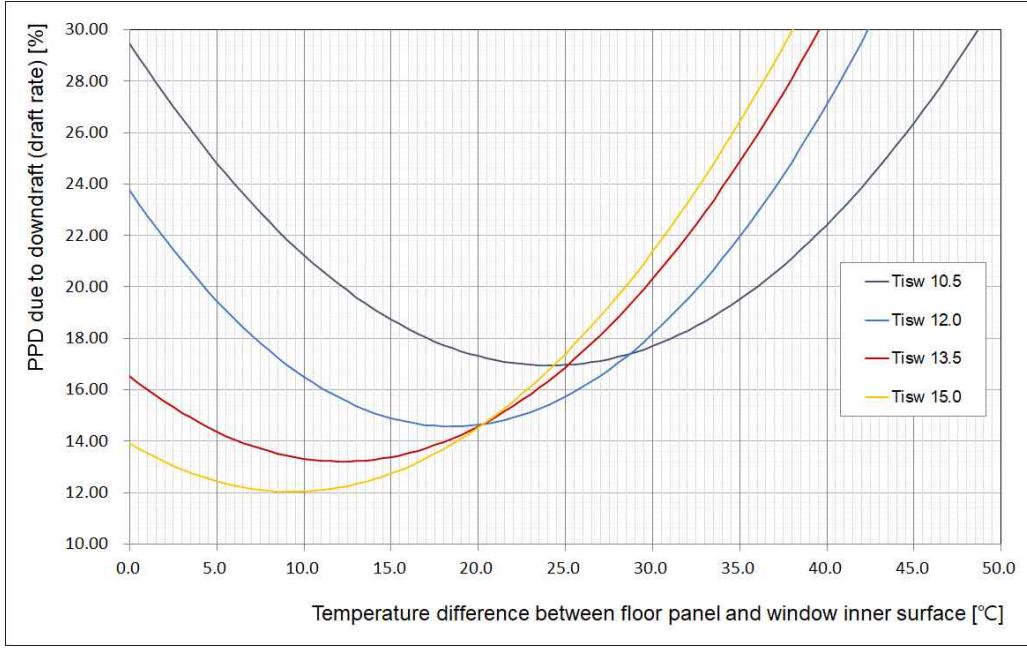
$$DR = 0.0013\Delta t^2 - 0.0323\Delta t + 11.745 \quad (R^2 = 0.9628) \quad T_{isw} 15.0 \quad (5.4)$$

$$DR_{cp} = \frac{\Delta DR(T_{isw_{reference}} - T_{isw_{target}})}{1.5} \quad (5.5)$$

$$\Delta DR = 0.0047\Delta t^2 - 0.3371\Delta t + 7.621 \quad (R^2 = 1) \quad T_{isw} 10.5 - 12.0 \quad (5.6)$$

$$\Delta DR = 0.0038\Delta t^2 - 0.2275\Delta t + 5.755 \quad (R^2 = 1) \quad T_{isw} 12.0 - 13.5 \quad (5.7)$$

$$\Delta DR = 0.0007\Delta t^2 - 0.0666\Delta t + 3.953 \quad (R^2 = 1) \quad T_{isw} 13.5 - 15.0 \quad (5.8)$$



[Figure 5.6] Draft rate by thermal output conditions of floor panel

$$DR = 0.0216\Delta t^2 - 1.0407\Delta t + 29.483 \quad (R^2 = 0.9714) \quad T_{isw} 10.5 \quad (5.9)$$

$$DR = 0.027\Delta t^2 - 0.9964\Delta t + 23.763 \quad (R^2 = 0.9678) \quad T_{isw} 12.0 \quad (5.10)$$

$$DR = 0.0224\Delta t^2 - 0.5463\Delta t + 16.542 \quad (R^2 = 0.9696) \quad T_{isw} 13.5 \quad (5.11)$$

$$DR = 0.0218\Delta t^2 - 0.4058\Delta t + 13.925 \quad (R^2 = 0.9643) \quad T_{isw} 15.0 \quad (5.12)$$

$$DR_{fp} = \frac{\Delta DR (T_{isw_{reference}} - T_{isw_{target}})}{1.5} \quad (5.13)$$

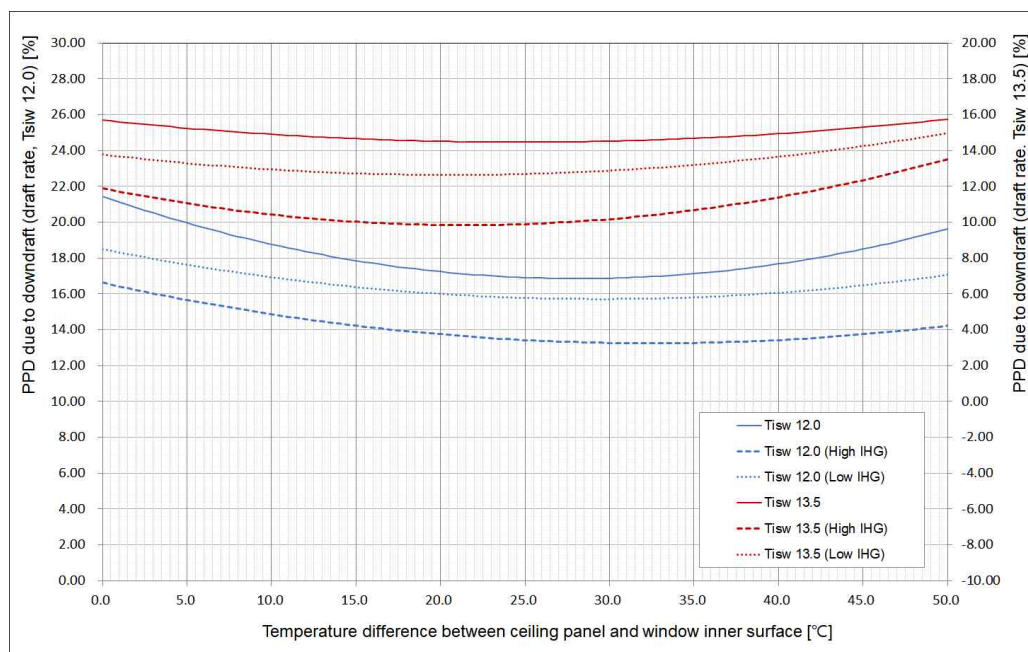
$$\Delta DR = -0.0054\Delta t^2 - 0.0443\Delta t + 5.722 \quad (R^2 = 1) \quad T_{isw} 10.5 - 12.0 \quad (5.14)$$

$$\Delta DR = 0.0046\Delta t^2 - 0.4501\Delta t + 7.221 \quad (R^2 = 1) \quad T_{isw} 12.0 - 13.5 \quad (5.15)$$

$$\Delta DR = 0.0006\Delta t^2 - 0.1405\Delta t + 2.617 \quad (R^2 = 1) \quad T_{isw} 13.5 - 15.0 \quad (5.16)$$

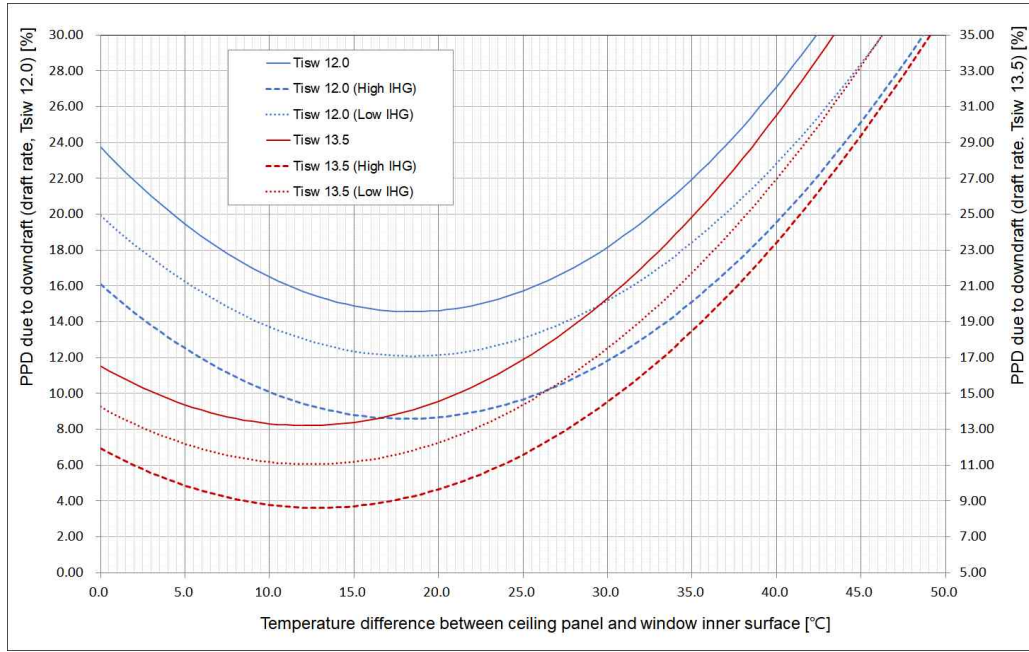
5.2.2 내부 발열의 영향에 따른 방열 조건 및 보정 계수

외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건에 내부 발열의 영향이 반영되면, 내부 발열량에 따라 [Figure 5.7] 및 [Figure 5.8]과 같이 패널의 방열 조건이 변화한다. 복사 난방 패널이 외주부에 적용된 경우, 패널의 배치 위치에 관계없이 내부 발열량에 따라 draft rate값이 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 내부 발열이 적용된 경우에는 난방 부하나 외부 환경 조건에 관계없이 내부 발열로 인한 열공급량에 따라 draft rate의 비율을 일정하게 저감할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 저감비율은 또한 패널의 배치 위치에 따라 다르게 나타난다.



[Figure 5.7] Draft rate by thermal output conditions of ceiling panel with Internal heat gains

이를 바탕으로 내부 발열을 통한 열공급량 즉, 냉방부하값에 따라 재실영역 시작지점에서의 draft rate 저감비율을 도출할 수 있으며, 이는 식 (5.17) 및 (5.18)과 같다.



[Figure 5.8] Draft rate by thermal output conditions of floor panel with Internal heat gains

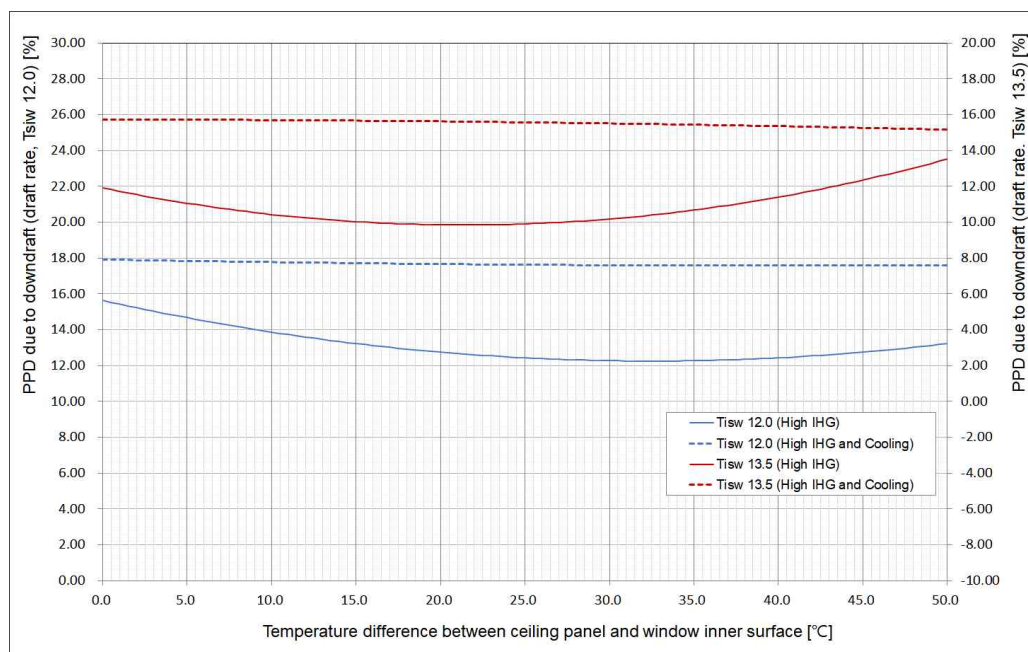
$$\Delta DR = 4E-06 Q_{CL}^2 - 0.0106 Q_{CL} + 7.9138 \quad (R^2 = 1) \quad RCHP \quad (5.17)$$

$$\Delta DR = 1E-06 Q_{CL}^2 - 0.0002 Q_{CL} + 1.6102 \quad (R^2 = 1) \quad RFHP \quad (5.18)$$

5.2.3 복사 냉방 패널의 영향에 따른 방열 조건 및 보정 계수

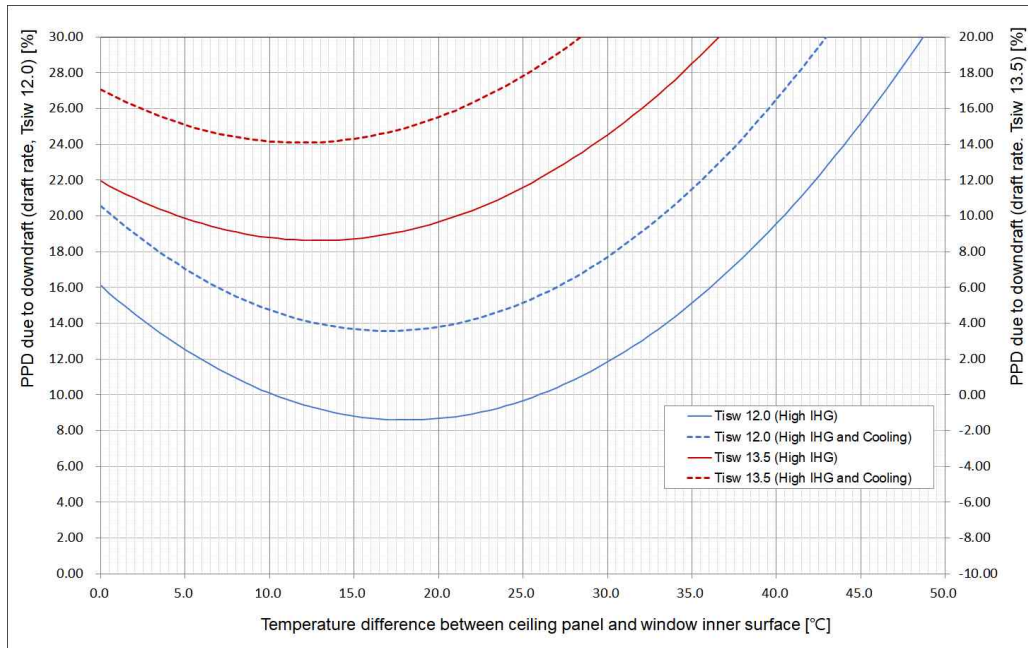
실에 내부 발열이 있을 있는 경우, 내부 발열을 냉방 부하로 판단하고 이를 제거하기 위해 복사 냉방 패널을 설치하였을 경우의 외주부에 설치된 복사 난방 패널의 방열 조건은 [Figure 5.9] 및 [Figure 5.10]과 같다.

천장 복사 난방 패널의 경우 복사 냉방 패널이 적용된 경우에는 채실영역 시작지점에서의 draft rate 수치가 일정한 경향을 나타내고 있다. 이는 복사 냉방 패널이 적용된 경우에는 외주부에 설치된 복사 난방 패널의 열공급이 충분하지 못하기 때문에 채실자의 쾌적성이 창문의 차가운 기류와 내부 발열량에 따라 결정되어서 나타난 결과로 볼 수 있다.



[Figure 5.9] Draft rate by thermal output conditions of ceiling panel with Internal heat gains and cooling panel

한편 바닥 복사 난방 패널 경우에는 외부 환경 조건의 변화에 따라 복사 냉방 패널이 없는 경우의 draft rate값에서 일정한 값이 증가하는 경향을 나타내었다. 복사 냉방 패널이 적용되면 재실영역 시작지점에서는 창문의 영향을 지배적으로 받으므로 외부 환경 조건에 draft rate를 도출할 수 있으며, 이에 따른 예측식은 식 (5.19) 및 (5.20)과 같다. 천장 복사 난방을 DR값을 바닥 복사 난방은 ΔDR 값을 구하여 복사 냉방 패널의 영향을 반영한다.



[Figure 5.10] Draft rate by thermal output conditions of floor panel with Internal heat gains and cooling panel

$$DR = 0.0347 T_{sw_{target}}^2 - 2.3113 T_{sw_{targetCL}} + 40.414 \quad (R^2 = 1) \quad RCHP \quad (5.19)$$

$$\Delta DR = -0.121 T_{sw_{target}}^2 + 3.567 T_{sw_{targetCL}} - 19.623 \quad (R^2 = 1) \quad RFHP \quad (5.20)$$

5.3 소결

본 연구에서 수행된 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 열쾌적성 평가 결과가 일반화된 데이터로 활용될 수 있도록 본 장에서는 열쾌적성 평가 결과에 따른 패널의 방열 조건 결과를 분석하고 경향성을 도출하였다. 복사 난방 패널의 배치 위치(천장 또는 바닥)에 따라 외주부에서의 열전달 매커니즘이 다르고 그에 따른 재실자의 열쾌적성 및 방열 조건의 경향이 다르게 나타나므로 방열 조건 차트는 천장 복사 난방 패널과 바닥 복사 난방 패널을 구분하여 제시하였다. 방열 조건은 앞선 방열조건 설정 프로세스에 따라 외부 환경조건과 복사 난방 패널의 관계성을 기본으로 하여 내부방열 및 복사 냉방 패널의 영향을 추가적으로 반영할 수 있도록 설정하였다. 이를 위하여 방열 조건에 각각의 영향을 반영할 수 있는 예측식 및 보정 계수를 제시하였다. 본 연구에서 제시된 복사 난방 패널의 방열 조건 차트는 downdraft로 인한 불쾌적성에 가장 민감한 앉아있는 재실자의 발목높이인 0.1m를 기준으로 하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 결과가 열쾌적성을 만족하는 기준이라면, 0.1m보다 높은 위치에서는 제시된 조건 이상의 열쾌적성을 확보하는 것이 가능하다고 판단할 수 있다.

- 1) 천장 복사 난방 패널을 외주부에 적용할 경우, 천장면에서 방출하는 따뜻한 기류가 창문에서 발생하는 하강기류를 증폭시켜서 기류 속도를 상승시키고 이로 인해 downdraft의 발생을 심화시킬 수 있지만, 창문 근처의 차가운 기류에 충분한 열을 공급하면 기류 속도가 상승하더라도 차가운 기류가 하강하는 것이 아니라 상대적으로 덜 차갑거나 따뜻한 기류가 하강하여 재실영역으로 유입되게 되므로 유입된 기류로 인

해서 재실자가 불쾌감을 느끼지 않을 수 있다. 그리고 바닥 복사 난방 패널의 경우에는 좁은 면적으로 적용을 하면 방열면에서 상승한 공기가 천장면을 타고 흘러내려가는 천장효과로 인하여 하강기류가 증폭될 수 있고, 넓은 면적으로 적용을 하면 창문 부근에 충분한 열량을 공급하지 못해 하강 기류를 막지 못할 수 있다. 따라서 천장 또는 바닥 복사 난방 적용 시에는 이와 같은 현상을 발생시키지 않도록 좁은 면적과 넓은 면적 지점 사이의 적정 방열 범위를 도출해야 한다.

- 2) 복사 난방 패널의 표면 온도와 창문의 실내 측 표면의 대표 온도간의 차이를 바탕으로 외부 환경 조건의 변화에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 천장 복사 난방과 바닥 복사 난방으로 구분하여 그래프 및 예측식으로 제시하였다. 그리고 이를 기본으로 내부 발열의 영향 및 복사 냉방 패널의 적용에 따른 방열 조건 변화를 도출하였다. 내부 발열의 영향을 받게 되면, 복사 난방 패널의 배치 위치에 관계없이 외부 환경 조건 즉 난방 부하에 따라 draft rate값을 일정하게 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 복사 난방 패널의 열쾌적성을 향상시킬 수 있다. 그러나 복사 냉방 패널이 적용되게 되면 천장 복사 난방의 경우에는 일정하게 높은 draft rate값이 나타나며, 바닥 복사 난방의 경우에는 draft rate값이 기준값 이상으로 증가하여 재실자의 쾌적성을 확보하는데 불리하다. 이와 같이 실내외 환경 요소 각각의 영향을 반영한 Δt 에 따른 draft rate 그래프를 통해 복사 난방 패널의 적정 방열 범위를 설정할 수 있으며, 또한 본 연구에서 평가하지 않은 실내외 환경 조건에 대해서도 제시된 그래프 및 예측식을 통해 도출할 수 있다.

3) 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건을 종합적으로 판단할 수 있도록 외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 기본으로 한 복사 난방 패널의 배치 위치별 방열 조건 차트를 제시하였다. 방열 조건 차트를 통해 내부 발열이 적용되었을 때의 draft rate 변화를 판단할 수 있는 계수를 제시하였으며, 복사 냉방 패널이 적용되었을 경우에도 이러한 영향을 반영할 수 있는 계수를 제시하였다. 본 차트에는 decay ratio값은 제시되지 않았지만, 차트에서 제시된 외부 환경 조건 및 방열 조건을 바탕으로 decay ratio값을 계산할 수 있으며, 이를 통해 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성을 보다 정밀하게 판단할 수 있다.

제 6 장 방열 조건을 이용한 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법

6.1 복사 난방 패널의 방열 조건 설정 방법

6.2 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 최적 방열 조건

건물에 복사 난방을 적용하는 경우에도 외주부에서 발생하는 난방 부하를 처리하고 downdraft와 같은 불쾌적 현상이 나타나지 않도록 창문 근처에 대류 난방 시스템을 추가로 설치해왔다. 그러나 본 연구를 통해 외기온이 너무 낮거나 창문의 열관류율은 너무 높은 경우, 즉 외부 환경 조건이 일정한 수준만 된다면 복사 난방 패널을 외주부에 적용하여도 downdraft로 인한 재실자의 불쾌적을 저감하면서 복사불쾌적의 문제도 발생시키지 않아 재실자의 쾌적성을 확보할 수 있다는 것을 확인하였으며, 열쾌적성 관점에서 복사 난방 패널이 외주부에 적용 가능한 조건을 정량적으로 표현할 수 있는 방열 조건 차트를 제시하였다.

따라서 본 장에서는 이러한 방열 조건 차트를 활용할 수 있도록 복사 난방 패널의 외주부 적용 시, 기존 설계 프로세스에서의 활용법 및 차트를 활용하여 방열 조건을 설정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 통해 복사 난방 패널의 외주부 적용 방법을 정립하였다. 또한 본 연구에서 복사 난방 패널의 방열 조건 차트를 활용하여 복사 난방 패널을 건물에 적용할 수 있도록 실제와 유사한 건물의 상황을 가정한 사례를 예시로 제시하여 복사 난방 패널의 외주부 적용에 활용할 수 있도록 하였다.

6.1 복사 난방 패널의 방열 조건 설정 방법

일반적으로 건물의 외주부에는 강제대류의 원리를 활용한 외주부 시스템 이을 적용하기 때문에 복사 난방 패널을 외주부에 적용하는 것에 대한 설계 기준 및 방법은 제시되지 않고 있다. 따라서 복사 난방 패널의 외주부 적용은 기존의 설계 프로세스상에서 추가적으로 고려를 해야 하는 부분이라 할 수 있으며, 본 연구에서 제시된 결과를 활용하기 위해서는 기준을 설계 프로세스상에서 어떻게 활용을 할 수 있으며, 이에 대한 범위 및 한계가 명확하게 제시되어야 한다.

이에 본 장에서는 외주부 적용을 위한 방열 조건을 제시한 본 연구의 기준 설계 프로세스상에서의 활용 방법과 범위 및 한계를 제시하였다. 또한 본 연구에서 제시된 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건을 설정할 수 있는 방법을 단계적으로 제시하여 향후 복사 난방 패널의 외주부 적용에 활용할 수 있도록 하였다.

6.1.1 복사 난방 패널의 기준 설계 프로세스에서의 활용 방법

복사 난방 패널의 설계에는 열쾌적 수준을 정하고, 실의 난방 부하에 따라 요구되는 방열량을 결정하는 과정을 거쳐 단계적으로 진행된다. 여기서 복사 난방 패널을 외주부에 적용하는 과정은 이와 같은 설계 프로세스에 따라 패널을 설계하는 과정에 추가적으로 적용되는 부분이라 판단할 수 있다. 즉, 기존의 설계 프로세스에 복사 난방 패널을 외주부에 추가로 적용하는 것이기 때문에 이러한 점들을 반영하여 기존의 설계 프로세스에 다음과 같은 내용을 추가, 제안하고자 한다.

(A) 복사 난방 패널의 적용 시에 난방면의 면적을 결정함에 있어서, 우선 복사 난방 패널을 외주부에 적용할지, 적용을 한다면 천장이나 바닥 어느 위치에 적용할지의 여부를 판단한다. 즉, 복사 난방 패널을 적용하고자 하는 실의 설정온도와 난방 부하에 따라 방열 조건을 설정하고, 이때 설정된 조건이 외주부에 적용 가능한지 복사 난방 패널의 방열 조건에 따라 판단하여 패널의 외주부 적용 여부 및 적용 위치를 결정한다. 여기서 패널의 외주부 적용에 대한 결정은 적용 가능한 대안을 도출하고 각 대안들을 열쾌적성 및 다른 평가 요소의 관점으로 비교하는 것이 실제 적용을 위해서는 유리하다.

(B) 외주부에 적용 가능한 복사 난방 패널이 적용 방법이 결정되거나 대안이 도출되면, 도출된 적용 방법에 따른 패널의 표면 온도를 검토하여 허용 가능 표면 온도를 결정하고 이때 선정된 복사 난방 패널의 대안을 선택한다. 허용 가능한 표면 온도는 재실자의 쾌적성 뿐만이 아니라, 에너지 효율성 및 경제성과 같은 요소도 고려해주어야 한다.

(C) 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 허용 가능한 표면 온도에 따라 단위 면적당 필요 방열량을 결정한다. 이때의 과정은 복사 난방 패널의 필요 방열량 또는 적용 가능한 방열량을 결정한 후 이때의 허용 표면 온도를 산출하여 역으로 평가하는 것도 가능하다.

(D) 허용 가능한 표면 온도 및 단위면적당 방열량에 따른 복사 난방 패널의 에너지 효율성 및 경제성에 대해서도 검토하여 최종적으로 복사 난방 패널을 적용하고자 하는 건물에 적합한 설계 방법을 채택한다. 복사 난방 패널의 외주부 적용은 재실자의 열쾌적성을 향상시킬 수 있는 방법으로 에너지

지 효율성이나 경제성보다 우선하지 않을 수도 있다.

6.1.2 복사 난방 패널의 외주부 적용 시의 방열 조건 설정 방법

복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 방열 조건은 [Figure 6.1]과 같은 단계로 설정할 수 있다.

먼저, 복사 난방 패널을 적용하고자 하는 대상 공간의 창문 열관류율과 설계 외기온에 따라 창문의 실내 측 표면온도의 대푯값을 계산하고 대푯값에 따라 포함되는 범위를 선정한 후 난방 부하를 계산하여 외부 환경 조건을 설정한다. 그리고 대상 공간에서 적용하고자 하는 복사 난방 패널의 외주부 적용 면적을 산출하고 패널의 방열량과 표면 온도를 계산한다.

다음은 복사 난방 패널의 optimal point를 결정하는 단계로 복사 난방 패널의 방열면 표면 온도와 창문의 실내 측 표면온도의 대푯값과의 차이에 따른 draft rate값을 reference value 및 보정계수를 활용하여 계산한다. 계산된 결과는 외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 재실영역 시작지점에서의 draft rate 수치를 의미하며, 열쾌적성 관점에서 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성을 판단하는 가장 기본적인 수치가 된다.

복사 난방 패널의 optimal point가 결정되면, 다음 단계는 실의 내부 발열을 반영하는 단계이다. 실에 내부 발열이 있으면, 내부 발열을 통한 열공급량 즉 냉방 부하량에 따라 draft rate의 수치가 일정한 비율로 저감되며, 이를 계산하기 위해 냉방 부하와 draft rate의 저감 수치를 계산한다. 마지막 단계는 내부 발열로 인한 발열을 제거해야 되는 냉방 부하로 판단하여 외주부에서의 난방 부하는 복사 난방 패널이 내부 발열로 인한 냉방 부하는 복사 냉방 패널이 담당하는 경우를 반영하는 단계로 복사 냉방 패널의 적용으

로 인해 증가되는 draft rate의 수치를 계산한다.

이와 같은 단계를 통해 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 방열 조건별 열쾌적성 평가 결과를 도출할 수 있으며, 도출된 결과를 바탕으로 에너지 효율성 및 경제성 등을 동시에 고려하여 대상 건물에 적합한 복사 난방 패널의 적용 방법을 엔지니어가 선택하여 적용할 수 있다.

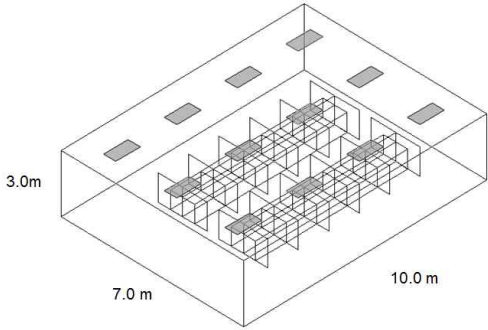
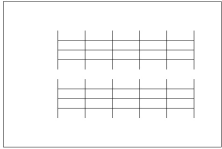
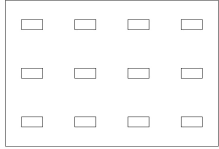


[Figure 6.1] Step of establishing thermal output conditions

6.2 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 최적 방열 조건

앞서 제시된 복사 난방 패널의 방열 조건 설정 방법에 따라 <Table 6.1>과 같은 공간에 복사 난방 패널의 외주부 적용을 위한 최적 방열 조건을 설정하였다. 방열 조건은 최소 외기온과 평균 외기온을 기준으로 각각의 경우에 복사 난방 패널의 열쾌적성을 확보할 수 있는 방열 조건을 구하는 것으로 가정하였다.

<Table 6.1> Example conditions of target space

Classification		Description
Room	Area	70m ² (7m X 10m, Width X Depth)
	Ceiling height	3.0m
	Occupied people	10 person
Window	Area	21m ² (7m X 3m, Width X Height), Whole window
	U-value	1.30W/m ² ℃
Outdoor temperature		Minimum : -10.2℃ Average : -3.0℃
Room layout		
		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Workstation</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Lighting</p> </div> </div>

Step 1. 외부 환경 조건의 설정

식 (4.10)에 따라 최소 외기온을 기준으로 창문의 실내 측 대표 표면 온도를 계산하면 14.229°C 이며, 평균 외기온을 기준으로 계산하면 15.605°C 이며, 식 (4.1)에 따라 난방 부하를 계산하면 각각 828.78W 와 631.22 이다. 따라서 본 공간은 $T_{\text{isw}} 14$ 와 $T_{\text{isw}} 15.5$ 범위의 외부 환경 조건이며, 복사 난방 패널의 적용 가능성을 보수적으로 접근하면 $T_{\text{isw}} 14$ 와 $T_{\text{isw}} 14.5$ 사이로 외부 환경 조건의 범위를 선정할 수 있다.

Step 2. 복사 난방 패널의 방열량 계산

대상 공간의 내부 배치가 창문으로부터 약 2.0m 떨어진 지점부터 워크스테이션이 배치되어 있으므로 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능 깊이를 1m 에서 최대 2m 까지로 볼 수 있으며 이에 따라 복사 난방 패널의 면적을 산출하면 각각 7m^2 과 14m^2 이 된다. 그리고 이때의 복사 난방 패널의 배치 위치별 방열량과 표면온도는 식 (4.14)와 식 (4.15)에 따라 계산할 수 있다. 천장 복사 난방 패널의 경우 7m^2 일 때 $118.40\text{W}/\text{m}^2$ 에 33.16°C , 14m^2 일 때 $59.20\text{W}/\text{m}^2$ 에 26.58°C 이며, 바닥 복사 난방 패널의 경우에는 7m^2 일 때 $118.40\text{W}/\text{m}^2$ 에 30.49°C , 14m^2 일 때 $59.20\text{W}/\text{m}^2$ 에 25.59°C 이다.

Step 3. 외부 환경 조건에 따른 복사 난방 패널의 optimal point

대상 공간의 외부 환경 조건 계수 T_{isw} 는 14.229 이며, 복사 난방 패널의 방열면 표면 온도와 창문의 실내 측 표면온도의 대표값과의 차이 Δt 는 천장 복사 난방 패널은 18.93°C , 12.35°C 바닥 복사 난방 패널은 16.26°C , 11.36°C 이다. 따라서 $T_{\text{isw}} 13.5$ 이 reference value가 되며, Δt 에 따른 DR값을 구한 후 보정 계수 ΔDR 을 계산하여 해당되는 외부 환경 조건에서의 DR값

을 계산할 수 있다. 천장 복사 난방 패널의 경우 reference value는 식 (5.3) 보정계수는 식 (5.5) 및 (5.8)을 활용하였으며, 이에 따라 재실영역 시작지점에서의 draft rate 계산 결과 각각 13.11%와 13.35%로 나타났다. 그리고 바닥 복사 난방 패널의 경우 reference value는 식 (5.11), 보정계수는 식 (5.13) 및 (5.16)을 통해 재실영역 시작지점에서의 draft rate 계산 결과는 각각 13.49% 및 13.14%로 나타났다.

Step 4. 내부발열의 영향에 따른 Draft rate

대상 공간의 내부 발열로 인한 냉방 부하량은 대상 공간에 가정된 인체, 조명, 기기별 발열량에 따라 식 (4.16)을 통해 계산할 수 있으며, 그 결과 냉방 부하량 2,306W가 된다. 냉방 부하값을 식 (5.17)과 (5.18)에 대입하면 내부 발열로 인한 Draft rate의 저감량을 구할 수 있으며, 그 결과 천장 복사 난방 패널의 경우 5.1054%를 저감하여 8.00%, 8.24%, 바닥 복사 난방 패널의 경우 6.8988%를 저감하여 6.59%, 6.24%로 나타났다.

Step 5. 복사 냉방 패널의 적용에 따른 draft rate

복사 냉방 패널의 적용으로 인한 draft rate의 증가율은 식 (5.19)와 (5.20)을 활용하여 계산할 수 있으며, 그 결과 천장 복사 난방 패널은 방열 조건에 관계없이 14.23%, 바닥 복사 난방 패널은 13.22%, 12.87%로 나타났다.

〈Table 6.2〉 Example results of target space

Classification			Step 3.		Step 4.	Step 5.
Draft rate [%]	Ceiling panel	7m ²	13.11	FCU : 17.78	8.00	14.23
		14m ²	13.35		8.24	
	Floor panel	7m ²	13.49	ABS : 22.13	6.59	13.22
		14m ²	13.14		6.24	

제 7 장 결 론

본 연구에서는 열쾌적성 측면에서 복사 난방 패널의 외주부 적용 가능성을 평가하는 것을 목적으로, 외주부에서의 열적 특성 및 열쾌적성 평가 방법을 분석하고 이에 따른 복사 난방 패널의 방열 특성을 고찰하였다. 그리고 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 위한 모델을 구축하여 CFD 시뮬레이션을 통해 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가를 수행하였다. 열쾌적성 평가는 복사 난방 패널의 열쾌적성에 영향을 줄 수 있는 건물의 실내외 환경 요소를 반영하여 평가하였으며, 이를 바탕으로 복사 난방 패널의 방열 조건과 외부 환경 조건과의 관계성을 분석하여 복사 난방 패널의 배치별 적정 방열 조건을 도출하고 열쾌적성 확보를 위한 방향성을 설정하였다. 그리고 외부환경 조건 및 내부발열과 같은 실내 환경 조건과 복사 난방 패널의 적용에 따른 기류 혼합 양상을 반영하여 복사 난방 패널의 최적 방열 조건을 제시하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 복사 난방 패널이 열쾌적성 관점에서 외주부에 적용 가능할지에 대한 평가는 차가운 창문과 채실자 사이의 대류 열교환으로 인한 downdraft 및 차가운 창문과 채실자 그리고 복사 난방 패널 사이의 복사 열교환으로 인한 복사불쾌적을 바탕으로 평가할 수 있다. 또한 본 연구에서는 복

사 난방 패널의 적용에 따른 downdraft의 발생 특성을 평가할 수 있도록 decay ratio of downdraft 라는 개념을 제시하여 열쾌적성 평가를 수행하였다.

(2) 복사 난방 패널의 외주부 적용에 따른 열쾌적성을 평가하는 경우에는, 건물의 다양한 환경 요소를 도출하고 열쾌적성에 긍정적인 요소와 부정적인 요소를 구분하여야 하므로, 이러한 특성에 따라 건물의 환경 요소를 도출하여 열쾌적성 평가의 조작 변수로 선정하였다. 또한 열쾌적성에 영향을 미치는 복사 난방 패널의 설계 요소도 도출하여 패널의 방열 조건에 따른 열쾌적성 평가를 수행할 수 있도록 하였다.

(3) 복사 난방 패널이 외주부에 적용된 건물에서의 열쾌적성 평가는 복사 난방의 복사열로 창문이 가열되는 효과와 외기의 영향으로 인해 발생하는 창문의 온도 구배에 따른 온도 profile을 해석할 수 있어야 하며, 침기나 내부발열과 같은 건물의 실내외 환경 조건 및 복사 난방 패널의 자연대류를 통한 방열 현상을 구현할 수 있어야 한다. 따라서 외부 환경 조건의 영향으로 인한 실내의 온열환경 변화 및 창문의 온도 변화, 실내 환경 요소의 영향 그리고 난방 부하의 제거 및 열쾌적성 확보를 위한 복사 난방 패널의 방열량을 고려할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 또한 복사 난방 패널이 외주부에 적용되었을 경우에는 열쾌적성에 영향을 주는 대상에 따라 각각 다른 공간 모델이 적용이 되므로, 복사 난방 패널과 차가운 창문과의 관계성을 분석하고, 건물의 실내외 환경 요소의 영향이 있을 때 복사 난방 패널의 적정 방열 조건을 설정할 수 있도록 시뮬레이션 모델을 단계적 평가가 가능하도록 구축하였다.

(4) 외기온 및 창문의 단열성과 같은 건물의 외부 환경에 의해 외주부의 열적 특성은 다양하게 나타날 수 있으므로 본 연구에서의 시뮬레이션 case에 해당되지 않는 조건에서의 열쾌적성 평가 결과와 그때 복사 난방 패널의 방열 조건에 대해서도 예측할 수 있도록 외부 환경 조건을 창문의 실내측 내표면 온도를 통하여 범위를 설정하고 예측식을 통해 열쾌적성을 평가할 수 있도록 하였다. 또한 패널의 방열량에 따라 허용 가능한 표면 온도를 산정하여 패널의 방열 범위를 설정하였다.

(5) 외주부에 적용된 복사 난방 패널의 열쾌적성 평가결과, 외부 환경 조건의 기준이 완화될수록 창문의 내표면 온도와 패널의 표면온도와의 차이가 감소하여 단위 면적당 상대적으로 작은 방열량으로 재실영역으로 유입되는 draft rate가 저감되고 decay ratio는 향상되었다. 이러한 경향은 패널의 방열면적 변화에 따른 열쾌적성 평가 결과에도 유사하게 나타났는데, 외부 환경 조건이 혹독한 경우에는 창문 근처에서 높은 표면 온도로 열을 공급해야 decay ratio를 향상시켜 재실영역으로 유입되는 차가운 기류를 차단할 수 있지만 외부 환경 조건이 완화될수록 draft rate의 height를 저감하여 패널의 방열면적을 넓게 하여도 decay ratio가 높게 나타났다. 그리고 복사 난방 패널의 배치 위치에 따른 decay ratio 값과 radiant temperature asymmetry를 비교해봤을 때, 복사 난방 패널의 외주부 적용 시 천장에 적용하는 것이 downdraft의 저감 및 복사불쾌적의 방지를 위해 유리할 것으로 판단된다.

(6) 복사 난방 패널이 외주부에 적용된 공간에 내부 발열의 영향을 받게 되면, 내부 발열로 인한 발생된 기류가 천장면으로 타고 창문 측으로 유입

되어 기류의 속도를 상승시켜 차가운 기류의 흐름을 증폭시키는 효과보다 실에 열을 공급해주고 차가운 공기를 가열시키는 효과가 더 크게 나타난다. 따라서 내부발열은 재실자의 쾌적성에 긍정적으로 작용한다고 볼 수 있으며, 이러한 영향이 클수록 decay ratio가 상대적으로 높게 나타나 downdraft로 인한 불쾌감을 저감할 가능성도 높다.

(7) 복사불쾌적은 온도만의 문제가 아니라 온도와 그에 따른 방열면의 면적이 중요한 요소로 작용한 결과로 볼 수 있는데, 복사 난방 패널은 높은 온도로 적용되더라도 이때의 방열면적이 복사불쾌적을 일으킬 정도도 크지 않기 때문에 복사 난방 패널의 높은 방열면 온도로 인한 복사불쾌적의 문제도 발생하지 않았다.

(8) 복사 난방 패널은 일정한 수준의 외부 환경 조건에서는 자연 대류를 통한 열공급 효과로 실내 온도를 균일하게 유지하고 차가운 창문으로 인한 기류 흐름을 저감하기에 충분한 열을 공급할 수 있었다. 그리하여 대류 난방 방식의 기존 외주부 시스템과 본 연구에서 제안된 복사 난방 패널의 열쾌적성을 비교 평가한 결과, 기존의 외부주 시스템에 비해 제안된 복사 난방 패널의 열쾌적성이 우수한 것으로 나타났다.

(9) 복사 난방 패널의 표면 온도와 창문의 실내 측 표면의 대표 온도간의 차이를 바탕으로 외부 환경 조건의 변화에 따른 복사 난방 패널의 방열 조건을 천장 복사와 바닥 복사로 구분하여 그래프 및 예측식으로 제시하였다. 그리고 내부 발열의 영향 및 복사 난방 패널의 적용에 따른 방열 조건 변화를 반영할 수 있는 보정계수를 도출하였다. 내부 발

열의 영향을 받게 되면, 복사 난방 패널의 배치 위치에 관계없이 외부 환경 조건 즉 난방 부하에 따라 draft rate값을 일정하게 감소시켜 열쾌적성을 향상시킬 수 있다. 그러나 복사 냉방 패널이 적용되게 되면 천장 복사 난방의 경우에는 일정하게 높은 draft rate값이 나타나며, 바닥 복사 난방의 경우에는 draft rate값이 기준값 이상으로 증가하여 채실자의 쾌적성을 확보하는데 불리하다. 이와 같이 실내외 환경 요소 각각의 영향을 반영한 Δt 에 따른 draft rate 그래프를 통해 복사 난방 패널의 적정 방열 범위를 설정할 수 있으며, 본 연구에서 평가하지 않은 조건에 대해서는 제시된 그래프 및 예측식 그리고 보정 계수를 통해 도출할 수 있다.

(10) 본 연구에서 제시된 방열 조건은 외부 환경의 다양한 변화는 충분히 반영하였지만, 건물에서의 내부 방열 및 복사 냉방 패널의 관계에 대해서는 제시된 예측식의 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 추가적인 케이스에 대한 평가가 필요하다. 또한 창면적비에 있어서는 커튼월 건물처럼 창면적비가 큰 건물을 대상으로 평가를 수행하였으므로 본 연구에서 제시된 결과는 보수적인 관점의 결과라 할 수 있다. 그리고 실험을 통한 결과 검증이 이루어진다면, 연구 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

(11) 본 연구는 복사 난방 패널의 열쾌적성을 평가하는 것에 초점을 맞추어 진행되었는데, 향후 열쾌적성이 확보된 조건에서의 에너지 효율성 및 경제성에 대한 분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 즉, 본 연구에서 제시된 복사 난방 패널의 외주부 부분 적용은 현재는 활발하게 적용되는 사례는 아니므로 다양한 관점에서 복사 난방 패널을 외주부에 실제로 적용할 수 있는지에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Andrius Jurelionis et al. CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces, Journal of Civil Engineering and Management 14, 2008, pp29-38.
2. ANSI/ASHRAE Standard 55p: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013, ASHRAE
3. Alison G, Kwok, Nicholas B, Rajkovich. Addressing climate change in comfort standards, Building and Environment 45, 2010 pp18-22.
4. ASHRAE (2013). ASHRAE Handbook Fundamentals
5. ASHRAE (2013). ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment
6. Atila Novoselac et al. A critical review on the performance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems, Energy and Buildings 34, 2002, pp219-230.
7. Birol I. Kilkis et al., A simplified model for the design of radiant in-slab heating panels, ASHRAE Transactions, 1995.
8. BS EN 15377-1 : Heating systems in buildings. Design of embedded water based surface heating and cooling systems, 2008
9. BS EN 1264-2 : Water based surface embedded heating and cooling systems. Floor heating: Prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods, 2009
10. Busch JF., Thermal responses to the Thai office environment, ASHRAE Transaction, 1990
11. B.W.Olesen et al., Thermal comfort in a room heated by different methods, ASHRAE Transactions 86, 1980
12. B.W. Olesen, W. Vereinfachte methode zur vorausberechnung des thermischen raumklimas. Heiz. Luftung Klima Haustech 46, 1995, pp219 - 225.
13. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady et al. Modeling the exergy behavior of human body, Energy 45, 2012, pp546-553.
14. Caroline Karmann et al. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems - A critical literature review, Building and Environment 111, 2017, pp123-131.
15. CENELEC, CENELEC Guide 29 Temperatures of hot surfaces likely to be touched, European committee for Electrotechnical Standardization. 2007
16. D. A. Griffith et al. Sensitivity to Temporal Variation in Thermal Conditions,

Ergonomics, 1974

17. Daeuk Shin et al. Development of Evaluation Method for Energy Balancing System in Super-large Complex Buildings, ISES 2011
18. Daeuk Shin et al. A Study on the Energy Balancing System and Operation method, The 1st Seminar on Renewable Energy and Indoor Air Environment for Comfort and Energy Conservation in Buildings, 2014
19. Daeuk Shin et al. Energy performance of balanced heat recovery systems with load-balancing, the 6th International Building Physics Conference (IBPC), 2015
20. Daeuk Shin et al. Application of the Pre-process on a Statistical Method for Reducing the Calculation Period, COBEE 2015
21. De Dear RJ et al., Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and Buildings, 2002
22. Donghyn Lim, Ventilation effectiveness as an indicator of occupant exposure to particles from indoor sources, Building and Environment 45, 2010, 1214-1224.
23. Dongwoo Kim et al. Estimation of the Cooling Capacity of Radiant Ceiling Panel (RCP) using Experimental Method, The 1st Seminar on Renewable Energy and Indoor Air Environment for Comfort and Energy Conservation in Buildings, 2014
24. Ealiwa, MA., et al., Field investigation of thermal comfort in both naturally and mechanically ventilated buildings in Ghadames , Indoor Air 99, 1999
25. E. R. G. Eckert et al. Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate, NACA Report 1015, 1951
26. Feustel HE. et al. Hydronic radiant cooling-preliminary assessment, Energy and Buildings 22, 1995, pp193-205.
27. Gao, T. et al. Perspective of aerogel glazings in energy efficient buildings. Building and Environment 95, 2016, pp405-413.
28. Goosang Joe et al. An Experimental Study on Thermal Performance of Double Skin Facade, 8th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, 2010
29. Goosang Joe et al. A Study on the Application of Radiant Floor Heating System to prevent Draft in Glass Curtain-wall Buildings, CLIMA 2013
30. Goosang Joe et al. Draft assessment of Glass Curtain wall Building with a Radiant Floor Heating System, Applied Sciences 7(10), 2017 pp99-121
31. H. Manz et al. Analysis of thermal comfort near cold vertical surfaces by means of computational fluid dynamics, Indoor and Built Environment 13, 2004, pp233-242.

32. Heidari, S., Thermal comfort in Iranian courtyard housing, Ph.D thesis, The university of Sheffield, 2000
33. Hua Ge et al. Experimental investigation of cold draft induced by two different types of glazing panels in metal curtain walls, *Building and Environment* 39, 2004, pp115-125.
34. Ilknur Turkseven Dogrusoy et al. A field study on determination of preferences for windows in office environments, *Building and Environment* 42, 2007, pp3660-3668
35. ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2013
36. Jonn Are Myhren et al. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating, *Energy and Buildings* 40, 2008, pp524-536.
37. Jorn Toftum et al. Human Response to Air Movement–Evaluation of ASHRAE’s Draft Criteria (RP-843), *HVAC & R Research* 9, 2003, pp187-202
38. Kwangwoo Kim et al, Radiant Heating and Cooling Systems, *ASHRAE Journal* 57(2), 2015, pp28-42.
39. K.C. Ng et al. Response surface models for CFD predictions of air diffusion performance index in a displacement ventilated office, *Energy and Buildings* 40, 2008, pp774-781.
40. Lechner Norbert. Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects. John wiley & sons, 2014.
41. Li Lan et al. The effects of air temperature on office workers well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings, *Applied Ergonomics* 42, 2010, pp29-36.
42. Lin Tian et al., The impact of temperature on mean local air age and thermal comfort in a stratum ventilated office, *Building and Environment* 46, 2011 pp501-510.
43. L. Schellen et al. Draught assessment during design : experimental and numerical evaluation of a rule of thumb, *Building and Environment* 57, 2012, pp290-301.
44. M.A. Humphreys, Outdoor temperature and comfort indoors, *Building Research and Practice*, 1978
45. M.A. Humphreys, Thermal comfort requirements, climate and energy, The Second World Renewable Energy Congress, 1992

46. M.A. Humphreys, An adaptive approach to thermal comfort criteria, the economy and society, 1997
47. Maxime Tye-Gingras et al, Comfort and energy consumption of hydronic heating radiant ceilings and walls based on CFD analysis, Building and Environment 54, 2012, pp1-13.
48. Nicol JF, Thermal comfort - a handbook for field studies toward an adaptive model, University of East London, 1993
49. Panu Mustakallio et al. Full-scale test and CFD-simulation of radiant panel integrated with exposed chilled beam in heating mode, Building Simulation 10, 2017, pp75-85.
50. P. E. McNall et al. Thermal and Comforts Sensations of Sedentary Persons Exposed to Asymmetric Radiant Fields, ASHRAE Transactions , 1970
51. Per Heiselberg, Draught risk from cold vertical surfaces, Building and Environment 29, 1994, pp297-301.
52. Per Heiselberg et al. Energy-Efficient Measures to Avoid Downdraft from Large Glazed Facades. ASHRAE Transaction 101, 1995, pp1127-1135.
53. Peter Lyons et al, Window Performance for Human Thermal Comfort, 2000 ASHRAE Winter Meeting, 2000
54. P.O. Fanger, Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering, Danish Technical Press, 1970
55. P. O. Fanger. Air turbulence and sensation of draught, Energy and Buildings, 12, 1988, pp.21-39.
56. P.O. Fanger, How to apply models predicting thermal sensation and discomfort in practice, The Building Research Establishment, 1994
57. Qibin He et al. CFD study of exhaled droplet transmission between occupants under different ventilation strategies in a typical office room, Building and Environment 46, 2011, pp398-408.
58. Rhee, K.N. et al. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. Building and Environment 91, 2015, pp166-190.
59. Salt, H. Preliminary design considerations for a rockbed/floor space-heating system. Building and Environment 20, 1985, pp221-231.
60. Schiavon S, Melikov AK, Energy saving and improved comfort by increased air movement, Energy and Buildings 40, 2008, pp1954-1960.
61. Schiller GE., Comparison of measured and predicted comfort in office buildings,

ASHRAE Transaction 1990, 1990

62. Sharda, A et al. Comparative study of simulation and experimentation for the U-value of double-glazed windows with inter-pane blinds. *Science and Technology for Built Environment* 21, 2015, pp179-189.
63. Shia-hui, Peng et al. Convection from a cold window with simulated floor heating by means of transiently heated flat unit. *Energy and Buildings* 23, 1995 pp95-103.
64. Shinsuke Kato et al. Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation, *Building and Environment* 40, 2005, pp301-310.
65. S.H. Park et al. Evaluation of the thermal performance of a Thermally Activated Building System (TABS) according to the thermal load in a residential building. *Energy and Building* 73, 2014, pp193-205.
66. S.J. Rees et al., A nodal model for displacement ventilation and chilled ceiling systems in office spaces, *Building and Environment* 36, 2001, pp753-762.
67. So Jeong Park et al. A Study on the Application Method of Radiant Heating Panels to Prevent Downdraft in Glass Curtain-wall Buildings, *International Building Physics Conference, IBPC 2012*
68. Star-CCM+. Tutorial Guide; Siemens Inc, 2017
69. Stanley Kurvers et al, A field study of the performance of the Dutch Adaptive Temperature Limits guideline, *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*
70. Taeyeon Kim et al, Two-step optimal design method using genetic algorithms and CFD-coupled simulation for indoor thermal environments, *Applied Thermal Engineering* 27, 2007, pp3-11.
71. Tatsuya Hayashi et al. CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant, *Building and Environment* 37, 2002, pp219-230.
72. Tiberiu Catalina et al, Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling, *Building and Environment* 44, 2009, pp1740-1750.
73. Tomonori Sakoi et al. Heat balance model for a human body in the form of wet bulb globe temperature indices, *Journal of Thermal Biology* 70, pp14-25.
74. U. Larsson et al. Experimental investigation of downdraught from well insulated windows, *Building and Environment* 37, 2002, pp1073-1082.
75. Vai Kuong Sin, A Numerical investigation of indoor air quality with CFD, *Korean Society for Computational Fluid Engineering* 10, 2005, pp87-93.

76. Wang, Z., et al. Modeling thermal comfort with radiant floors and ceilings, university of californai, 2009
77. W.D. Cheong, Measurements and computations of contaminant's distribution in an office environment, Building and Environment 38, 2003, pp135-145.
78. Weilin Cui et al. Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance, Building and Environment 68, 2013, pp114-122.
79. Yoonkyu Seo et al. Indoor, Thermal Comfort Characteristic Of The Living Space Of College Students, International Journal of Applied Engineering Research, 2011
80. Yousef Al Horr et al. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature, Building and Environment 105, 2016, pp369-389.
81. 김상호, 고층 인텔리전트 사무소건물의 평면계획 특성, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 2003, pp355-358.
82. 미래부, 건물 에너지 효율 향상을 위한 SMART Energy Balancing 기법 연구 4차년도 보고서, 2014
83. 오지현 외, 재실자 쾌적을 고려한 창호 설계 관점에서의 건물에너지 효율화 정책 개선방안, 대한건축학회 논문집, 2016, pp65-72.
84. 이선우, 사무공간의 통합모듈 시스템 구축을 위한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 2004
85. 이승호, 기후학, 푸른길, 2007
86. 이한석 외, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 1991, pp173-178.
87. 정기범 외, 칸막이 공조 급기 시스템의 냉방 특성에 대한 시뮬레이션과 실험 평가, 대한건축학회 논문집 계획계 22, 2006, pp287-294.
88. 조가영, 사무공간의 환경성능을 고려한 워크스테이션유닛 구축에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 2006
89. 조구상 외, 바닥복사난방이 적용된 사무소 건물의 Downdraft 평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 - 계획계 31(4), 2014, pp203-212.
90. 황정하 외, 천장형 냉방기를 이용한 교실의 온열환경 개선에 관한 연구, 한국생활환경학회지 13, 2006, pp74-88.

ABSTRACT

Evaluating Thermal Comfort and Establishing Thermal Output Condition of Radiant Heating Panel for Application of Perimeter Zone in Buildings

By Joe, Goo Sang
Ph.D. Dissertation
Department of Architecture
Graduate School of Seoul National University
Advised by
Professor Yeo, Myoung Souk
2018. 2.

The present study aims to evaluate whether thermal discomfort such as downdraft in perimeter zone can be prevented by applying a radiant heating panel in glass curtain wall buildings. A radiant heating panel does not directly supply heat to cold air, but does so via heat exchange with a cold airflow. Assessing whether a downdraft is prevented is, thus, necessary.

Also, thermal output of radiant heating panel may be sensitive to the flow of the indoor airflow, so detailed consideration should be given to the influence of indoor and outdoor environments such as infiltration and internal heat gains etc. And there should be no problem of radiant asymmetry discomfort due to the thermal output of radiant heating panel.

Therefore, in this study, it was evaluated whether a radiant heating panel can be applied to the perimeter zone in terms of thermal comfort. For this purpose,

the thermal comfort in the perimeter zone of buildings and the thermal output characteristics of radiant heating panels were investigated, and simulation model was constructed to evaluate the thermal comfort of radiant heating panels applied to the perimeter zone. Using this simulation model, the thermal comfort was assessed through CFD simulation. Based on the assessment results of thermal comfort, the thermal output conditions which can apply the radiant heating panel to the perimeter zone of the building is suggested. The thermal output conditions of the radiant heating panel proposed in this study can be utilized in the design for the perimeter zone application of the radiant heating panel in the future.

Keywords : radiant heating panel, perimeter zone, thermal comfort, thermal output conditions, surface temperature, CFD simulation

Student Number : 2010-30173